

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

К. В. Марусич, А. Н. Поляков

УПРАВЛЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ СТАНКА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Монография

Рекомендовано к изданию Ученым советом федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург
2013

УДК 621.9 (075.8)
ББК 34.63-5 я 73
М 29

Рецензент - доцент кафедры «Основы конструирования машин» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», доктор технических наук, доцент А. П. Кузнецов.

Марусич, К. В.
М 29 Управление исполнительными органами станка на основе прогнозирования тепловых характеристик : монография / К. В. Марусич, А. Н. Поляков; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2013. - 182 с.

Рассмотрен метод прогнозирования тепловых характеристик металлорежущих станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов. Представлен обзор публикаций в области формирования и компенсации температурной погрешности станков. Описаны разработанная методика компьютерного моделирования и метод прогнозирования тепловых характеристик станков. Представлен алгоритм компенсации температурной погрешности станка.

Монография предназначена для оказания методической помощи студентам технологических и конструкторских специальностей машиностроительных вузов, может быть полезна технологам и конструкторам машиностроительных предприятий.

УДК 621.9 (075.8)
ББК 34.63-5 я 73

© Марусич К. В.,
Поляков А. Н., 2013
© ОГУ, 2013

Содержание

Введение	5
1 Обзор состояния тепловых явлений в станках	7
1.1 Актуальность тепловых явлений в станках	7
1.2 Переменные режимы работы станка	17
1.3 Сравнительные испытания станков на холостом ходу и под нагрузкой	24
1.4 Применение CAE-систем для создания тепловых моделей в станках	29
1.5 Современные системы компенсации температурной погрешности в станках	35
2 Экспериментальные исследования термдеформационного состояния металлорежущего станка	43
2.1 Методика проведения экспериментов	43
2.2 Серия испытаний в условиях непрерывного режима работы	48
2.3 Серия испытаний в условиях нагревание-остывание	53
2.4 Серия испытаний в условиях переменных тепловых режимов	56
2.4.1 Серия хаотичных режимов работы	57
2.4.2 Серия повторно-кратковременных режимов работы	63
2.5 Экспериментальные зависимости температурных перемещений от температур в металлорежущих станках	68
3 Моделирование термдеформационного состояния станков	75
3.1 Математическое описание	75
3.2 Методика создания программного средства в среде CAE-системы	81
3.3 Апробация разработанного программного средства	88
4 Метод прогнозирования тепловых характеристик станка	100
4.1 Базовые уравнения метода	100
4.2 Математическое описание прогнозируемых характеристик	106

4.3 Автоматизированное построение прогнозируемых тепловых характеристик	122
4.4 Реализация метода прогнозирования тепловых характеристик	130
5 Экспериментальная апробация метода прогнозирования.....	134
5.1 Прогнозирование температурных характеристик	134
5.1.1 Прогнозирование температурных характеристик для I-го типа циклограмм ..	135
5.1.2 Прогнозирование температурных характеристик для II-го типа циклограмм	142
5.1.3 Прогнозирование температурных характеристик для III-го типа циклограмм	145
5.1.4 Прогнозирование температурных характеристик для IV-го типа циклограмм	146
5.2 Прогнозирование характеристик температурных перемещений	150
5.3 Средства управления исполнительными органами станка по снижению его температурной погрешности	153
Заключение.....	162
Список использованных источников	165

Введение

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

Для достижения стабильной размерной точности механообработки в пределах 10 мкм необходимо оснащение станков системами компенсации температурной погрешности, которые строятся на двух альтернативных методах: прямое измерение температурной погрешности на станке и прогнозирование температурной погрешности. Первый метод обладает высокой точностью, но требует оснащения станка дополнительным измерительным оборудованием, что приводит к существенному увеличению стоимости станка (не менее чем на 30 %). Точность второго метода полностью определяется качеством реализуемых моделей прогнозирования тепловых характеристик. На сегодняшний день в открытой печати отсутствует описание моделей и методов прогнозирования тепловых характеристик станков, адаптированных к применению в системах компенсации их температурной погрешности.

Монография состоит из пяти глав.

В первой главе рассмотрены вопросы, посвященные исследованию тепловых явлений в станках. Диапазон рассмотренных вопросов в обзоре был ограничен следующими вопросами:

- актуальность тепловых явлений в станках;
- переменные режимы работы станка;
- сравнительные испытания станков на холостом ходу и под нагрузкой;
- применение САЕ-систем для создания тепловых моделей в станках;
- современные системы компенсации температурной погрешности в станках.

Во второй главе описана методика проведения натурных тепловых испытаний, проведенных на фрезерно-сверлильном станке высокой точности Deckel FP3 (Германия). Приведены результаты натурных экспериментов для различных режимов

работы станка. В завершении главы представлены экспериментальные зависимости температурных перемещений от температур в металлорежущих станках.

В третьей главе представлена разработанная методика компьютерного моделирования тепловых характеристик станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов. Описаны последовательность формирования расчетной модели для теплового расчета и алгоритм термодиформационного моделирования несущей системы станка. Представлены разработанные компьютерные модели и результаты их верификации.

В четвертой главе представлен метод прогнозирования тепловых характеристик станков разработанный на кафедре технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов Оренбургского государственного университета. Представлены базовые уравнения метода и математическое описание прогнозируемых характеристик. Изложена информация о программном средстве, написанном на языке системы MATLAB, основных экранных формах и графических окнах с результатами прогнозирования. В завершении главы представлена реализация метода прогнозирования тепловых характеристик.

В пятой главе представлены результаты экспериментальной апробации разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик, а также алгоритм компенсации температурной погрешности станка.

1 Обзор состояния тепловых явлений в станках

1.1 Актуальность тепловых явлений в станках

Тепловые деформации составляют существенную долю в общем балансе погрешностей обработки на металлорежущих станках. В работах [57, 60, 99, 103, 104] показано, что доля погрешностей обработки вследствие температурных деформаций может составлять до 30 % - 70 % от общей погрешности обработки. Полную погрешность обработки Δ_t , связанную с температурными деформациями, обычно определить не удастся. Приближенно принимают для операций с жесткими допусками на обработку $\Sigma\Delta_t = (0,1...0,4)\Delta_\Sigma$, причем для обработки лезвийным инструментом $\Sigma\Delta_t = (0,1...0,15)\Delta_\Sigma$, при шлифовании $\Sigma\Delta_t$ составляет от 30 % до 40 % суммарной погрешности Δ_Σ [26]. Особенно заметно их влияние при выполнении чистовых операций, при которых статистические и динамические деформации упругой системы станка не оказывают существенного влияния на погрешности, возникающие при обработке детали.

Первые работы, посвященные исследованию влияния тепловых процессов на точность металлорежущих станков, были проведены Шлезингером в начале 30-х годов. В нашей стране начальный период исследований связывают с именем Д. Н. Решетова и относят к 40-м годам [18, 110, 111]. Однако полномасштабные исследования под его руководством были проведены лишь в 50-е и 60-е годы [2, 14, 31, 120, 123]. Эти и ряд других работ заложили фундамент в разработку тепловых моделей металлорежущих станков и определили основные направления тепловых исследований.

Значительный вклад в области тепловых исследований внесла большая плеяда ученых: В. И. Алферов, А. И. Бельзецкий, А. И. Глухенький, И. А. Зверев, А. П. Кузнецов, Г. А. Левит, М. З. Лурье, Л. Я. Перель, А. Н. Поляков, А. С. Проников, В. Э. Пуш, А. В. Пуш, Ж. С. Равва, Л. Г. Рейдман, Е. И. Самохвалов, А. П. Сегиди, Ю. Н. Соколов, Ю. М. Соломенцев, В. С. Стародубов, А. М. Фигатнер,

В. Н. Юрин, В. В. Юркевич, A. Palmgren, K. Okushima, M. Sakamoto, J. Jedrejewski, Y. Ito и многие другие.

В ходе экспериментальных исследований теплового состояния одностоечного координатно-расточного станка [31] были выявлены основные источники тепла и построены температурное поле станка и тепловые деформации шпинделя. Основными источниками теплообразования оказались шпиндельная бабка, размещенная на стойке и двигатель главного движения, размещенный внутри стойки. Нагрев стойки вызвал угловые и линейные смещения оси шпинделя. Суммарные линейные смещения оси шпинделя в горизонтальной плоскости составили 19 мкм, хотя температурный градиент при этом в стенках стойки не превышал $3^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$.

Тепловые деформации плоскошлифовальных станков, вызванные тепловыми потоками из шпиндельной бабки и станины, представлены в работах [122-124]. Было установлено, что интенсивный тепловой поток из бабки в стойку в станке с вертикальной осью шпинделя создает неравномерный нагрев стенок стойки и ее искривление, что вызвало угловые смещения оси шпинделя и изменение взаимного углового положения торца шлифовального круга и стола. Это привело к непараллельности торцев изделий, достигающую до 0,010 - 0,012 мм на 100 мм длины изделия. В станке с горизонтальной осью шпинделя наиболее нагретой деталью является станина, в отсеках которой расположены механизмы станка и баки гидросистемы охлаждения. Нагрев станины сравнительно равномерный и температурные деформации станины относительно небольшие, теплота же, поступающая в колонну из станины, вызывает неравномерный нагрев и температурные деформации последней и, как следствие, нарушение заранее заданного углового положения оси шпинделя и плоскости стола.

В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований выполненных различными авторами, среди которых К. С. Колев, Б. Т. Бреев, Ю. Н. Соколов и Ю. М. Соломенцев. Так, отмечается, что при исследованиях станка мод. 1K62 при избыточной температуре в коробке скоростей от 25°C до 35°C , смещение шпинделя по вертикали составляло от 36 до 40 мкм, в горизонтальной плоскости от 16 до 20 мкм. Особое внимание в этой работе уделено влиянию на выход-

ную точность станка трех основных участников процесса резания: станок-инструмент-деталь. В работе отмечается, что погрешности, вызываемые температурными деформациями системы СПИД, сказываются на изменении размеров статической и динамической настроек. Одним из радикальных средств борьбы с такого рода погрешностями считается применение систем автоматического управления, позволяющие на всех этапах технологического процесса управлять параметрами точности обрабатываемых деталей. Уже в этой работе предлагалось встраивать в систему СПИД соответствующие датчики для более полной оценки температурных деформаций и внесения поправок в ход технологического процесса. Наиболее полно в работе представлены результаты экспериментальных исследований для гидрокопировального станка мод. 1722. Экспериментальные исследования производились на станке со снятием стружки. Отмечается, что различие в температурных деформациях шеек шпинделя и центра задней бабки приводит к появлению дополнительной погрешности установки детали в центрах. В связи с этим предложено несколько технических решений по минимизации влияния этого фактора на формирование погрешностей обработки детали. Реализация базирования корпусов передней и задней бабок на станину по одну сторону от оси центров и создание условий равномерного распределения давления между упорными подшипниками шпинделя, позволили снизить погрешность несовпадения оси центров шпинделя и задней бабки с 0,011 мм до 0,002 мм. Особое внимание в этой работе уделено рассмотрению вопросов влияния температурных деформаций элементов технологической системы на динамическую настройку станка. В качестве определяющего фактора рассматривалось изменение жесткости из-за нагрева элементов конструкции станка. Экспериментально был определен характер изменения жесткости от времени работы станка. При этом отмечено, что температурные деформации привели к уплотнению стыков и как следствие – к увеличению жесткости гидрокопировального суппорта.

В работе [125] выполнено экспериментальное исследование термдеформационного состояния фрезерного станка с ЧПУ мод. 6520ФЗ на холостом ходу с частотой вращения шпинделя 1600 об/мин при крайних положениях шпиндельной бабки (верхнее и нижнее). Отклонение оси шпинделя от первоначального положения через

семь часов непрерывной работы составило 61 мкм для крайнего верхнего положения и 92 мкм – для ее крайнего нижнего положения.

Исследованию температурных деформаций отделочно-расточных станков посвящены работы [12, 28]. В работе [28] изложены результаты исследования температурных полей и деформаций, горизонтальных отделочно-расточных станков и рассмотрено влияние на них особенностей компоновки и конструкции этих станков. Основными источниками теплоты в станке являются шпиндельные головки, электродвигатели, гидронасосная установка, цилиндр перемещения стола и гидроаппаратура. Как показали исследования, смещение оси шпинделя относительно стола в основном определяется влиянием двух независимых источников теплоты – гидропривода и шпиндельных головок.

Исследования температурных деформаций плоскошлифовального станка, проведенные в работе [50], показали, что основными источниками теплоты являются: гидропривод стола, подшипники опор шпинделя, электродвигатель поперечной подачи. Проведенные исследования показали, что вертикальное смещение шлифовального круга относительно стола достигает 150 мкм за 7 часов непрерывной работы. Смещение шлифовального круга вдоль оси шпинделя составляет 115 мкм за время стабилизации температуры нагрева.

Исследованию тепловых деформаций станков с использованием тепловых труб посвящены следующие работы [142, 143]. Применение тепловых труб является эффективным средством для выравнивания температуры нагрева узлов станка. Этим способом осуществляется следующее: излишняя теплота отводится на теплосъемник – холодильник, находящийся на станке; теплота отводится в аккумулятор теплоты с последующим возвратом в станок при перерывах в работе или во время работы на режимах с малым тепловыделением; теплота перераспределяется между деталями и механизмами станка; теплота подводится от внешнего источника. Тепловые трубы отличаются высокими эксплуатационными характеристиками при относительно небольших размерах и простоте конструкции, что дает возможность использовать их в различных станках. При этом не тратится дополнительная энергия, передаются большие тепловые потоки.

При исследовании точности токарно-револьверных станков мод. 1А425 [13] были определены смещения оси шпинделя в вертикальной и горизонтальной плоскостях при работе станка с различной частотой вращения шпинделя. Основными источниками выделения теплоты в станке являются подшипники передней и задней опор шпинделя, а также электродвигатель и гидросистема. Их температура после 6 часов испытаний при $n = 630$ об/мин составила соответственно 34, 50, 51 и 38 °С. Теплообразование в этих узлах в значительной степени определяет тепловое состояние станка.

В работах [113, 115] был проведен анализ результатов температурных расчетов быстроходных шпиндельных узлов станков токарной, фрезерно-расточной и шлифовальной групп, который показал характерную зависимость температуры опор от параметра быстроходности по среднему диаметру подшипника. Конструктивные особенности корпуса шпиндельного узла и шпинделя, а также особенности системы смазывания, характеристики и количество смазочного материала, подаваемого к опорам, могут повлиять на условия тепловыделения и теплоотвода от подшипников.

Для изготовления деталей инструментально-штамповой оснастки широко используются электроэрозионные вырезные станки. В работе [109] исследовали влияние тепловых деформаций, возникающих в процессе эксплуатации таких станков на точность обработки. Предварительно анализировали температурные поля и тепловые деформации станков моделей 4732Ф3М, 4733ПФ3 и МА4738Ф3, различающихся технологическими возможностями, компоновкой и классом точности. Было установлено, что в основном причиной возникновения погрешностей такого рода являются: нагрев рабочей жидкости; нагрев деталей, перемещающих суппорт (стол) и консоль (салазки) станка; изменение температуры воздуха в цехе в течение рабочего дня; нагрев траверсы с расположенными на ней двигателями механизма перемотки и натяжения электрода-проволоки. Исследования показали, что тепловые деформации механизмов и узлов достигают от 5 до 20 мкм.

В работах [54, 55, 139] рассмотрено распределение тепловых потоков и влияние тепловых деформаций, возникающих в двусторонних торцешлифовальных станках мод. 34321 АД и мод. 3А343АДФ2. Обработка деталей на таких станках

связана с выделением значительного количества теплоты ввиду большой площади и длительности контакта круга с заготовкой, затруднительного подвода СОЖ к зоне резания и удаления стружки из нее. В этих работах установлено, что при плоском шлифовании торцом круга на двустороннем торцешлифовальном станке с подачей СОЖ на водной основе 10 % возникающей теплоты переходит в станок, 5 % уходит с деталями, а 85 % уносится вместе с СОЖ. Указанные соотношения могут изменяться в зависимости от конструкции станка, вида СОЖ, вместимости и бака охлаждения. В ходе эксперимента было выявлено, что тепловые деформации приводили к перемещениям шлифовальных кругов по трем осям X, Y и Z. Однако перемещения в осевом направлении по оси Y компенсировались в результате износа кругов и подналадки их в процессе шлифования. Наиболее существенное влияние на качество обработки оказывали перемещения кругов в плоскости, проходящей через оси шпинделей перпендикулярно к станине станка в плоскости YZ. Тепловые испытания проводились в течение 6 - 7 часов непрерывной работы станка на холостом ходу и при имитации процесса шлифования за счет использования термоэлектрических нагревателей. Анализ тепловых характеристик позволил составить картину тепловых деформаций станка мод. 3342Д. При работе станка на холостом ходу температурным деформациям в основном подвергаются наружные торцы станины и шлифовальных бабок, а центр станины деформируется незначительно. В результате этого относительное расположение кругов становится вверх уже. В процессе шлифования центральная часть станины прогревается сильнее наружных торцов, что приводит к изменению относительного расположения кругов (вверх шире).

В работах [60, 61] показано, что температурные деформации в значительной степени влияют на точность многошпиндельных автоматов, под влиянием которых в узлах изменяются условия контакта и смазывания, первоначальные зазоры между деталями и т.д. Исследования показали, что в установившемся тепловом режиме ось шпиндельного блока и центральная направляющая продольного суппорта автомата мод. 1Б265П-6К искривлена. При $n = 805$ об/мин искривление оси рассматриваемых узлов превышало 120 мкм, в этом случае изменились условия контакта деталей и зазор.

Вопросы температурных деформаций круглошлифовального станка и их снижение рассмотрены в работах [33, 122]. Источниками теплоты в этом станке являются баки с маслом гидросистемы и с охлаждающей жидкостью. Они нагревают воздух внутри станины, который омывает и нагревает стенки станины. В результате стенка стола с заготовкой получает наклон. Ось заготовки смещается из первоначального положения, и ее размер увеличивается в пределах 0,02 - 0,05 мм.

Экспериментальные данные, полученные при изучении температурных полей шпиндельных бабок различных типов с помощью тепловизора ТВ-3, свидетельствуют, что тепловые смещения шпинделей в большинстве случаев определяются температурой нескольких характерных точек [105]. Для всех исследованных шпиндельных узлов с различными типами опор две характерные точки расположены на передней и задней опорах в зонах их наибольшего нагрева. В опорах качения преобладает теплоотдача, и наиболее нагретым элементом является наружное кольцо подшипника. В опорах скольжения с большим расходом смазочной жидкости или газа преобладает конвективный перенос теплоты, и самую высокую температуру наблюдают в месте выхода смазочного материала из опоры. Еще двумя характерными точками, определяющими наименьшую температуру, являются точки, расположенные обычно на передней и задней стенках корпуса шпиндельной бабки у мест стыка со станиной станка.

Новые электромеханические приводы главного движения, получившие название мотор-шпинделей и предназначенные для токарных, расточных и многоцелевых станков, представляют собой шпиндельную бабку со встроенным асинхронным электродвигателем, ротор которого установлен непосредственно на шпинделе. Такие приводы отличаются компактностью, высокой степенью унификации, надежностью, возможностью работы в силовом и скоростном режимах [56]. Однако наличие в корпусе шпиндельной бабки дополнительных источников тепловыделения (ротора и статора) увеличивает теплонапряженность шпиндельного узла и обуславливает существенные температурные деформации, непосредственно влияющие на положение оси шпинделя.

Важным направлением снижения температурных деформаций и их влияния на точность станка является уменьшение “чувствительности станка” к изменению его температурных полей. Это достигается на основе изготовления его отдельных деталей (станин и других базовых деталей, шпиндельных бабок, шпинделей, опор шпинделей и др.) из материалов с малым температурным коэффициентом линейного расширения (из высоколегированного чугуна, полимербетона, синтеграна, инвара, керамики и др.). Синтегран по сравнению с чугуном имеет следующие основные технические преимущества [140]: в 4 - 5 раз выше демпфирующая способность; минимальные внутренние напряжения в отливках и, соответственно, повышенная стабильность размеров; в 40 раз ниже теплопроводность и, соответственно, малая чувствительность деталей из синтеграна к перепаду температур нагрева; высокая коррозионная стойкость.

При проектировании и сборке опор шпинделей необходимо учитывать отрицательное влияние температурных деформаций, приводящих к изменению предварительного натяга в подшипниках при их нагреве. Теплота от наружного кольца к окружающим деталям поступает более интенсивно, чем от внутреннего кольца к шпинделю. Температура внутреннего кольца в процессе работы выше температуры наружного кольца. Последнее по сравнению с внутренним кольцом удлиняется в меньшей степени, что вызывает уменьшение зазора в подшипнике, установленном при его монтаже. В работе [58] рассмотрены варианты конструкций, приводящие к снижению температурных перемещений в станках.

В работах [144-146] приводятся результаты исследований температуры нагрева и температурных деформаций шпиндельной бабки токарного станка мод. МК-3002 завода “Красный пролетарий”. Проведенные исследования точности станка при изменении его теплового состояния позволили установить, что смещение оси шпинделя в вертикальном направлении не влияло на показатели точности изготавливаемой детали, а смещение в горизонтальном направлении приводило к увеличению величин погрешностей формы и размеров.

В работах [68, 70, 73, 74, 77] в качестве объектов экспериментальных исследований использовали токарные, шлифовальные, расточные, фрезерные и многоцеле-

вые станки средних размеров различной точности. Температура измерялась на наружных поверхностях станка. В ходе одного испытания одновременно фиксировались показания от одиннадцати до двадцати термодатчиков (в различных сериях экспериментов) с погрешностью измерений температуры не более $\pm 0,2$ °С. Показания фиксировались первые полчаса через каждые две минуты, а последующие моменты времени – через каждые пять минут. Измерения температурных перемещений осуществлялись с помощью трех многооборотных индикаторных головок с ценой деления 1 мкм, которые фиксировали перемещения вдоль трех осей шпинделя станка. В работе [73] проводили тепловые испытания станка 2Е450А для четырех скоростей шпинделя: 2000, 1600, 1000 и 100 об/мин при непрерывной работе станка в течение 3 часов. Исследования показали, что температурный разброс между точками станка в конце эксперимента составил от 30 % до 38 % от избыточной температуры: для скорости 2000 об/мин избыточная температура 13,8 °С, а расхождение между наименее и наиболее нагретыми точками станка не превысило 5 °С; для скорости 1000 об/мин – соответственно 4 °С и 1,5 °С. Для более высоких частот вращения шпинделя (1600 и 2000 об/мин) превалировали температурные перемещения в поперечном направлении по оси Y; по двум другим координатам перемещения практически одинаковые, их расхождения сопоставимы с точностью измерения перемещений. На предельной частоте вращения 2000 об/мин максимальные температурные перемещения в конце эксперимента составили по осям X, Y и Z – 11, 22 и 10 мкм соответственно. В результате была разработана автоматизированная система поиска и принятия решений по обеспечению теплоустойчивости металлорежущих станков [77].

Исследования влияния тонких теплоизолирующих прокладок и стыков на температурное поле станка представлены в работах [15-17]. Эксперименты проведены в лаборатории Берлинского технического университета на стенде, предназначенном для исследования влияния теплоизолирующих материалов на температурное поле и тепловые деформации шпиндельных узлов. Для частот вращения 1000, 2000, 3000 и 4000 об/мин были проведены серии экспериментов, в ходе которых измеряли установившуюся температуру наружного и внутреннего колец подшипников и температуру шпинделя. Источниками теплоты для шпинделя являлись его опоры.

Мощность их тепловыделения определяли по экспериментально установленным значениям температуры. Перепад температур в стыке внутреннего кольца с телом шпинделя в зависимости от частоты вращения последнего составлял от 5 °С до 12 °С. Влияние стыка тем значительнее, чем выше частота вращения шпинделя, определяющая мощность тепловыделения.

При исследовании тепловых деформаций столов токарно-карусельных станков с круговыми гидростатическими направляющими планшайбы установлено, что вследствие разницы температур нижней и верхней поверхностей планшайбы и основания стола они приобретают чашеобразную форму [134]. В результате при работе станка возникает деформация заготовки или дрейф наладочных координат.

В работах [3-6] проанализированы температурные смещения в ряде станков от внешних и внутренних источников тепла. Определена допустимая температуроустойчивость систем СПИД в зависимости от характеристик деталей-представителей и процесса их обработки.

В работах [27, 69, 71, 78, 80, 83, 84] были выполнены тепловые испытания следующих металлорежущих станков: фрезерно-сверлильного Deckel FP3, плоскошлифовального ШПХ32.11 и фрезерного ЛФ260МФ3 при различных частотах вращения шпинделя. Тепловые испытания станка Deckel FP3 проводились на двух скоростях вращения шпинделя 2000 и 2500 об/мин. Анализ экспериментальных тепловых характеристик показывает, что уровень избыточных температур за семь часов непрерывной работы при частоте вращения шпинделя 2000 об/мин на различных наружных поверхностях станка составил в диапазоне от 1,5 °С до 12 °С, а за пять часов непрерывной работы станка на частоте 2500 об/мин – от 1,5 °С до 14 °С. Тем не менее, из экспериментальных температурных характеристик время температурной стабилизации станка – не зафиксировано. По всем координатам стабилизация температурных перемещений не фиксировалась. На частоте вращения шпинделя, равной 2500 об/мин, перемещения по оси X составляли около 10 мкм, по оси Z – 52 мкм и Y – 60 мкм. Решение задач данного исследования было направлено на разработку методики сокращенных тепловых испытаний станков, в которой использовался алгоритм, позволяющий гарантированно обеспечивать 50 % сокращение длительности

натурных испытаний [27, 84]. Экспериментальная апробация разработанных алгоритмов показала, что погрешность оценки для тепловой постоянной времени первой моды не превышает 10 %, что обеспечивает погрешность прогнозирования температур и температурных перемещений не более 5 %.

В работах [147, 148, 152, 153] приведены результаты экспериментальных исследований податливости и теплостойкости фрезерного станка УФ-280 при сверлении отверстий. Исследования теплостойкости заключались в измерении температуры станка в характерных точках и в определении смещения шпинделя в процессе разогрева. Испытания проводили, после того как станок не работал в течение 48 часов, и его температура становилась равной температуре окружающей среды. Показания снимали через каждые 5 минут после включения станка. Станок работал на холостом ходу с частотой вращения равной 4000 об/мин. Время выхода на установившийся тепловой режим немногим более 3 часов. Измерения показали, что наивысшая температура наблюдалась около электродвигателя и достигла своего максимума, равного 55,5 °С. Перемещение осей шпинделя при разогреве станка в плоскости симметрии станины достигали 19 мкм, а в плоскости, перпендикулярной к плоскости симметрии станка – 9 мкм.

В работах [126-131] рассмотрены характеристики тепловыделений и температурных деформаций в станках с ЧПУ, схемы их формирования и влияния на точность выходных параметров станка. Дана классификация и подробный анализ способов снижения тепловыделений и температурных деформаций, включая компоновочно-конструктивные и эксплуатационные, на основе коррекции влияния данных деформаций, а также путем отвода (охлаждения) выделяемой теплоты и, наоборот, путем предварительного нагрева узлов станка перед началом его работы.

1.2 Переменные режимы работы станка

В настоящее время выполнено большое количество экспериментальных исследований температурных деформаций различных металлорежущих станков с оп-

ределением их величин, характера протекания и влияния исследуемых температурных деформаций на точность станков в условиях непрерывной работы. Реальная механообработка реализуется в условиях изменяющихся во времени режимов его работы, обусловленных технологическим процессом изготовления конкретной детали. Ниже приведен обзор работ связанных с исследованием тепловых деформаций металлорежущего станка в условиях его переменной работы.

Большое влияние на характер кривой разогрева и конечную температуру узла имеют кратковременные остановки [122, 123]. Так, например, после семи часов непрерывной работы станка мод. А955 избыточная средняя температура корпуса шпиндельной коробки станка была 12,4 °С. После тех же семи часов работы станка по циклу - «45 минут работы – остановка длительностью 15 минут», избыточная средняя температура корпуса коробки снизилась до 7,8 °С, т.е. примерно на 26 %.

В работах [65, 76] было выполнено экспериментальное исследование термодформационного состояния многоцелевого и плоскошлифовального станка в условиях повторно-кратковременного режимов работы. В качестве объекта исследований был выбран многоцелевой станок мод. МС 12-250 М1-2 высокой точности [65]. Экспериментальные исследования проводились на частоте 2000 об/мин с чередованием 20-минутного нагрева и 10-минутного остывания. В данном эксперименте контролировались тепловые перемещения только шпиндельной головки (ШГ), а не собственно шпинделя. Эти исследования позволили установить лишь одну из составляющих тепловых перемещений шпинделя, так как его тепловые перемещения складываются из компоновочных составляющих, обусловленных особенностями компоновки станка, и шпиндельных составляющих, обусловленных конструктивными особенностями шпиндельного узла. На рисунке 1.1а представлены экспериментальные температурные характеристики в различных точках станка. Датчики температуры были установлены следующим образом: семь датчиков на ШГ: датчики 1 и 4 – на верхней части ШГ; датчики 6 и 8 – на передней торцовой части ШГ на подшипниковой крышке передней опоры шпинделя; датчики 2, 3 и 5 – на боковых гранях ШГ. Датчик 7 устанавливался на левой вертикальной направляющей станины непосредственно под суппортом; датчики 9 и 10 – на левой и правой стенках станины на вы-

соте 250 мм; датчик – на электродвигателе. Тепловые перемещения представлены на рисунке 1.1б.

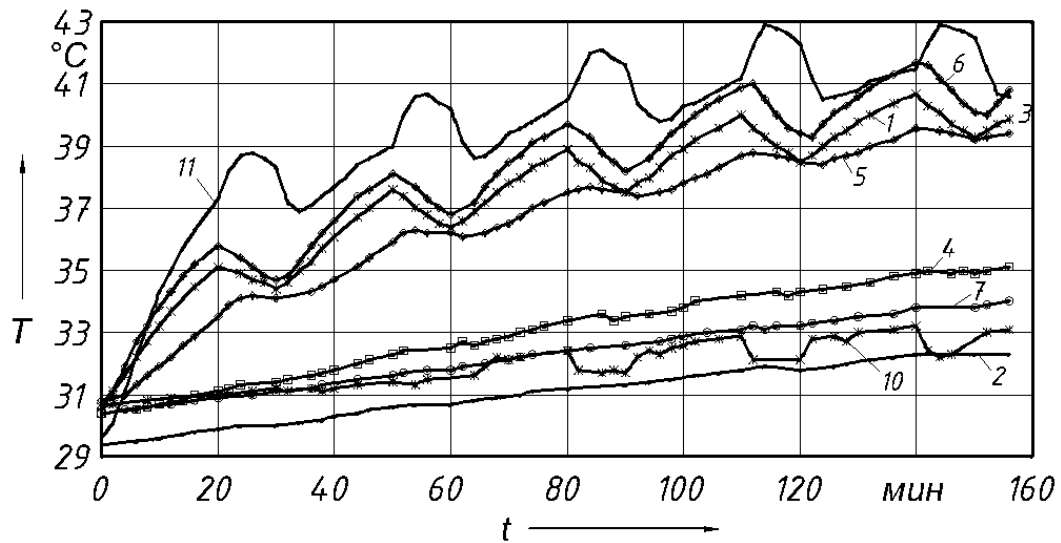


Рисунок 1.1а – Температурные характеристики станка мод. МС 12-250 М1-2 в условиях повторно-кратковременного режима работы, $n = 2000$ об/мин

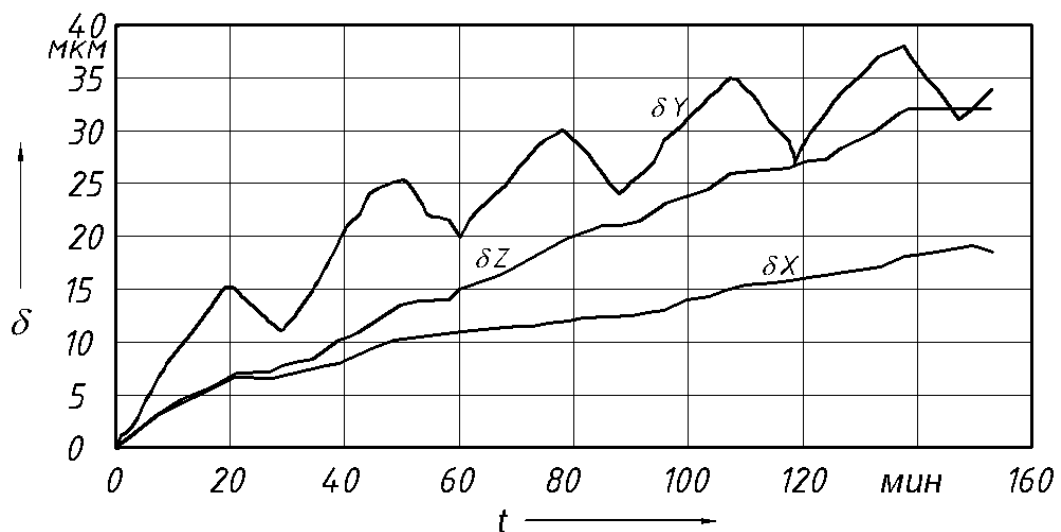


Рисунок 1.1б – Температурные перемещения ШГ станка мод. МС 12-250 М1-2 в условиях повторно-кратковременного режима, $n = 2000$ об/мин

Только перемещения по оси Y наиболее строго отражают характер изменения режимов работы привода. Максимальное перемещение составило 38 мкм. В условиях повторно-кратковременного режима работы станка в периоды отключения привода в различных элементах станка (в зависимости от их компоновочного расположения) характер флуктуаций температурного поля неоднозначен и отражает одновременно

протекающие процессы нагрева и остывания. При этом флуктуации температурного поля станка показывают зависимость его теплового состояния от условий конвективного теплообмена.

В условиях эксплуатации станков различного целевого назначения имеют место различные виды режимов работы шпиндельного узла и, соответственно, различные виды реализаций тепловых характеристик узлов во времени. В специальных и специализированных станках обычно применяется постоянный режим обработки заготовок. Так, например, для внутришлифовального шпинделя (диаметр шейки 40 мм), после предварительной обкатки и достижения установившегося теплового режима (рисунок 1.2), последующие незначительные колебания температуры шпиндельного узла, связанные с заменой обрабатываемых заготовок, практически не оказывают влияния на точность обработки [106, 107]. В универсальных станках, в том числе с ЧПУ и многоцелевых, применяют широкий спектр режимов обработки. В этом случае кривые изменения температур элементов шпиндельного узла теоретически состоят из нескольких участков экспонент, соответствующим различным режимам работы узла [105].

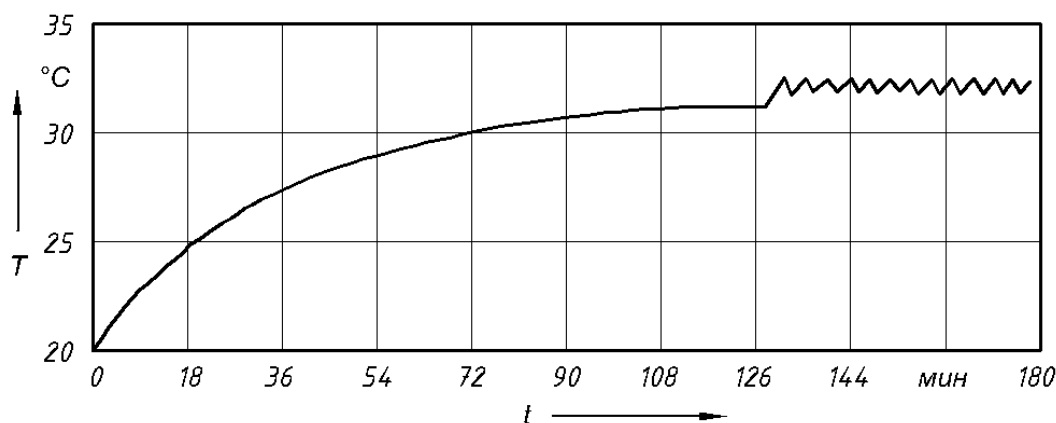


Рисунок 1.2 – Изменение во времени температуры опор внутришлифовальной головки

В работе [107] представлены результаты теплового исследования шпиндельного узла токарного станка модели МК7530Ф3 при работе в течение первых четырех часов. Из рисунка 1.3 видно, что с течением времени температуры элементов шпин-

дельного узла могут претерпевать значительные изменения, которые необходимо прогнозировать. Это желательно и по той причине, что зачастую условия эксплуатации высокоточного станочного оборудования практически не отводят времени на термостабилизацию. При составлении управляющих программ для станков с ЧПУ необходимо учитывать величины теплового смещения шпинделя с целью коррекции положения инструмента.

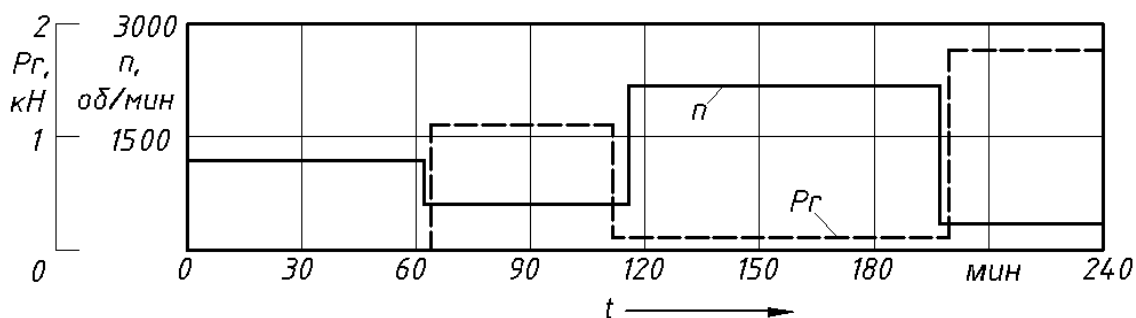


Рисунок 1.3а – Изменение во времени частоты вращения (n) и радиальной нагрузки (Pr) работы токарного станка

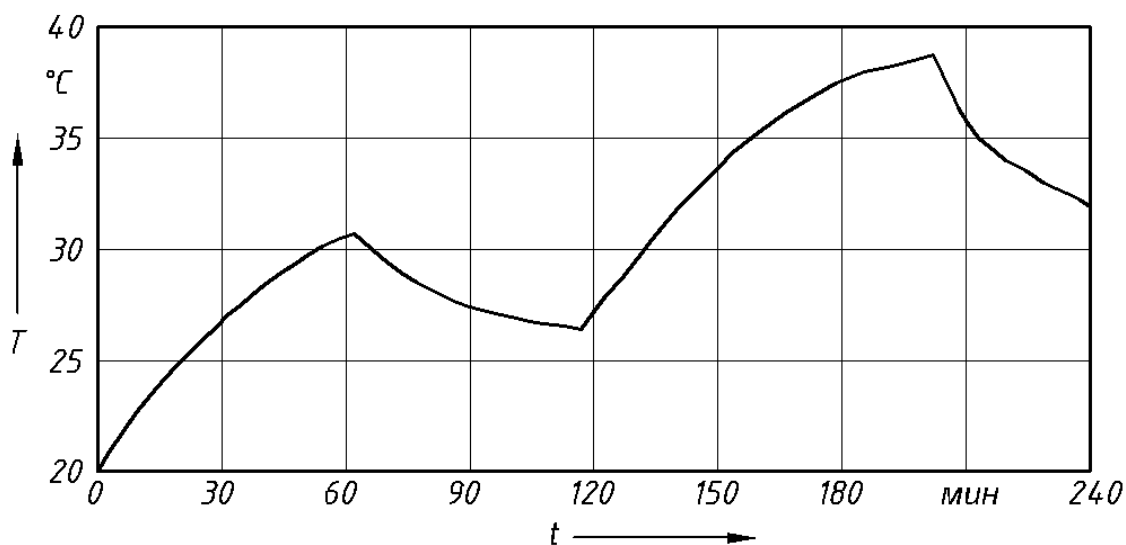


Рисунок 1.3б – Изменение во времени температуры переднего подшипника токарного станка модели МК7530Ф3

В работах [149, 151] были проведены испытания при обработке заготовок и изменении частоты вращения шпинделя. Частота вращения изменялась через 15 минут, и в это же время снимались показания температуры и смещений. На рисунке 1.4

приведено изменение температуры, и смещение шпиндельной бабки токарного станка при ступенчатом изменении частоты вращения шпинделя во времени в измеряемых точках. Температурные кривые, в общем, копируют диаграмму нагрузок, четко следуя за ее повышениями и снижениями. При этом между показаниями температуры в отдельных точках сохраняется определенная разность температур. Высота пиковых температур соответствует пиковым нагрузкам, в то же время все температурные кривые со временем повышаются, что соответствует росту температуры окружающей среды (кривая 1).

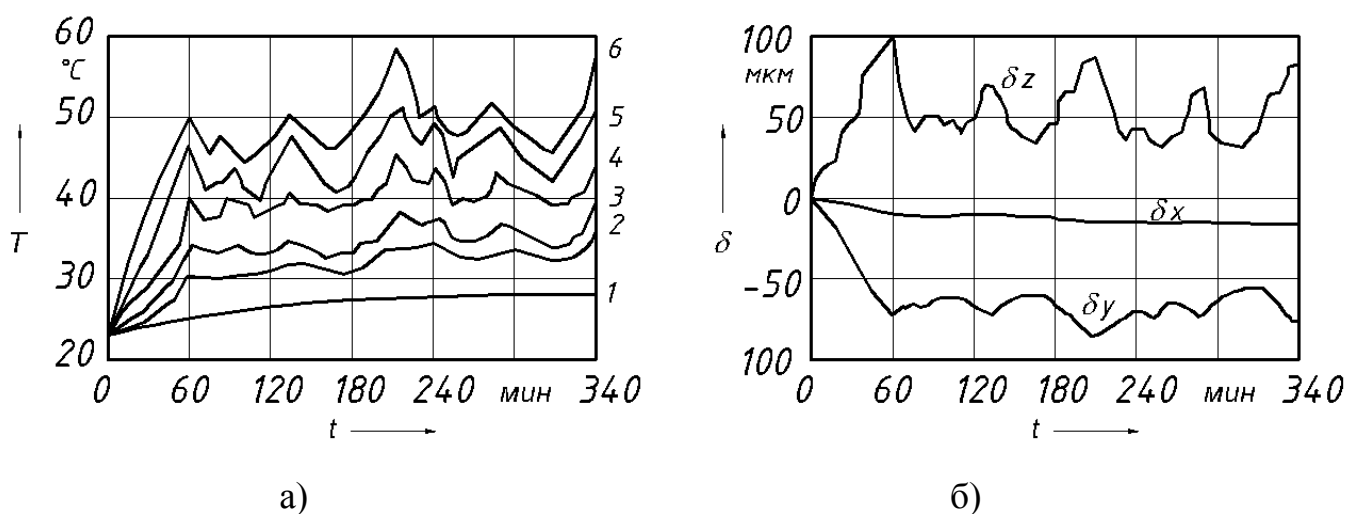


Рисунок 1.4 – Изменение температуры и смещение шпиндельной бабки токарного станка при ступенчатом изменении частоты вращения шпинделя

Одним из перспективных направлений в создании высокоточных алгоритмов температурной компенсации станков с использованием систем ЧПУ является использование нейросетевых технологий [75, 79, 81, 82]. Главной составляющей разработки алгоритмов прогнозирования тепловых характеристик станков и компенсации их температурной погрешности является использование экспериментальных данных натурных испытаний. В работе [79] в качестве объекта исследований был выбран специализированный токарный станок высокой точности ТПК-125В. При проведении натурных испытаний определяли тепловое и деформационное состояние станка при его нагреве на различных частотах вращения шпиндельного узла; изменение деформационного состояния станка при останове и повторном включении

шпиндельного узла. Программа натурного эксперимента включала три режима работы станка при частоте вращения шпиндельного узла n , равной 700, 1300 и 2150 об/мин в условиях непрерывного и повторно-кратковременного режимов. Повторно-кратковременный режим заключался в чередовании непрерывной работы станка в течение 20 минут с остановкой шпиндельного узла на 6 минут. Тепловые перемещения измеряли с помощью многооборотных индикаторных головок типа МИГ с ценой деления 1 мкм. С помощью индикаторных головок измеряли перемещения подшипниковой крышки передней опоры шпинделя в трех точках по трем координатам X, Y и Z. На рисунке 1.5 для функций экспериментальных координатных перемещений введено буквено-цифровое обозначение: координата и частота вращения.

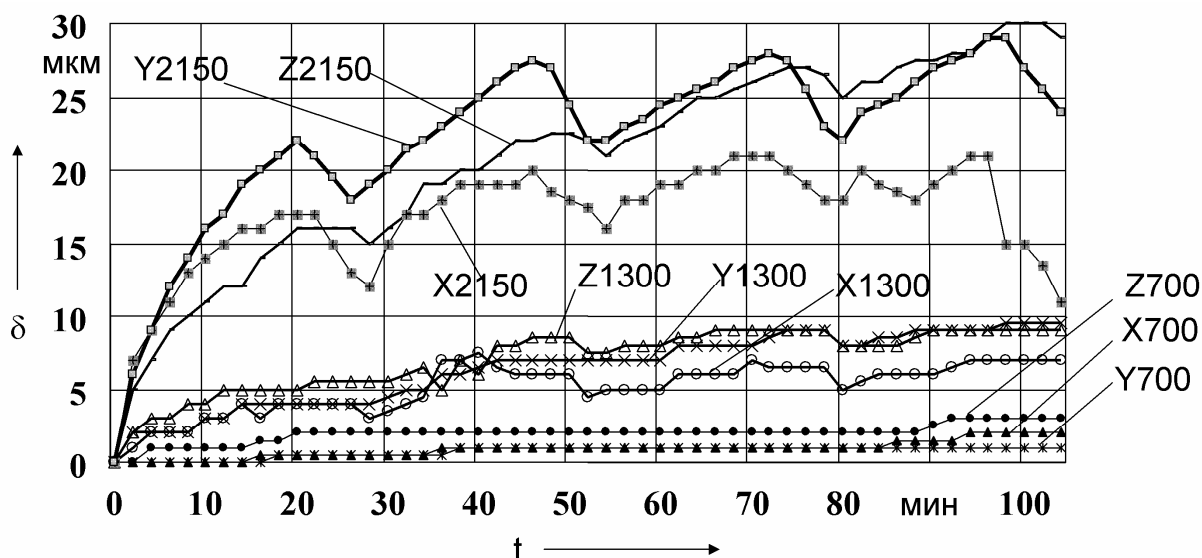
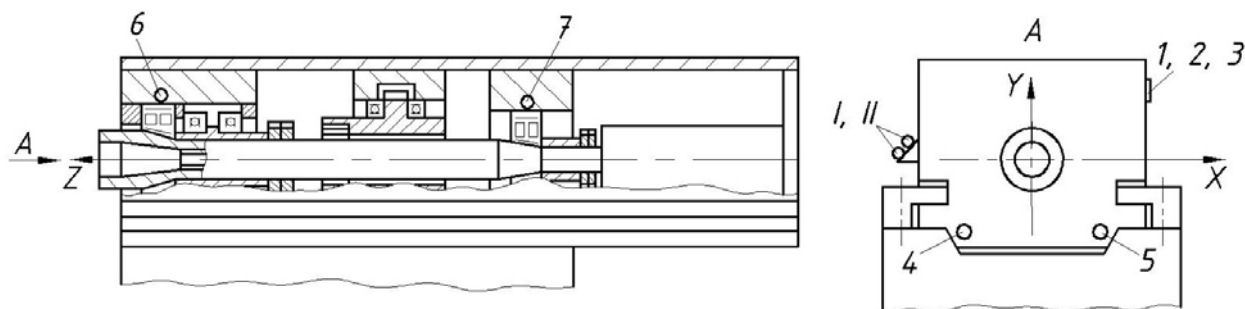


Рисунок 1.5 – Экспериментальные температурные перемещения подшипниковой крышки передней опоры шпинделя станка ТПК 125-В при повторно-кратковременном режимах работы (n равно 700 (X700, Y700, Z700), 1300 (X1300, Y1300, Z1300) и 2150 (X2150, Y2150, Z2150) об/мин)

Технически, температурная погрешность станка определяется эффективностью работы установленных на нем систем температурной коррекции и/или активными системами термостабилизации, в зависимости от класса точности станка [157, 166, 171].

1.3 Сравнительные испытания станков на холостом ходу и под нагрузкой

Испытания шпиндельной головки на примере многооперационного фрезерно-расточного станка с ЧПУ MC12-250 проводились под руководством автора к.т.н. Дальского С. А. и инженера Самойлова В. Б. в испытательно-диагностическом центре кафедры «Станки и автоматы» МВТУ им. Н.Э. Баумана [100, 101]. Шпиндельная головка смонтирована в шпиндельной бабке и представляет собой ползун жесткой конструкции (рисунок 1.6) с приводом поступательного движения от шариковой винтовой пары. В головке установлен шпиндель на радиальных двухрядных роликовых подшипниках в передней и задней опорах и двумя упорными шарикоподшипниками, установленными в передней опоре.



I, II – фотоприемники; 1-7 – термопары

Рисунок 1.6 – Шпиндельная головка станка MC12-250

Инструмент устанавливают в шпинделе с помощью резьбовой затяжки и механизма зажима. Шпиндельная головка подвержена как силовым, так и температурным воздействиям. Источники теплоты (подшипники шпинделя) имеют переменные параметры, и интенсивность тепловыделения в подшипниках зависит от технологических операций. Положение источника теплоты в зоне резания случайное и также зависит от процесса обработки деталей. Это приводит к нестационарному температурному режиму.

Для регистрации траектории возвратно-поступательного движения на торце шпиндельной бабки были установлены два фотоприемника I и II, позволяющих ре-

гистрировать траекторию движения в плоскостях YZ и XZ одновременно. Для диагностики теплового состояния применены хромель-никелевые термопары.

Испытание шпиндельной головки проходило в два этапа.

1. Вначале проводили предварительные эксперименты, на основании которых устанавливали параметры случайных траекторий, анализировали характер их изменения во времени, предварительно оценивали величину и скорость смещения, выявляли соотношение полученных отклонений траекторий и допусков, установленных нормативно-технической документацией.

2. Основные эксперименты проводились при действии эксплуатационных нагрузок во время обработки типовых деталей.

Анализ характера движения шпиндельной головки позволил в первом приближении ограничиться одной опорной точкой, которая помещена на переднем торце головки на расстоянии 50 мм от центра шпинделя. В опорной точке устанавливался измерительный преобразователь линейных перемещений оптико-электронного устройства для оценки отклонений траектории в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Испытания проводились при обработке типовых деталей на различных режимах с использованием стандартного инструмента.

При работе станка из-за изменения тепловых полей происходило смещение траекторий. Величина смещения была различной и менялась с течением времени. При приближении станка к термоустойчивому состоянию переориентация траекторий заметно сокращалась. Анализ данных, полученных в результате испытания, показал, что на первое место следовало поставить температурные деформации, затем геометрическую точность направляющих и их упругие деформации в стыках.

При анализе точности прецизионных станков исследовали влияние тепловых полей на форму траектории поступательного движения, а не только на смещение всей совокупности траекторий. Для этой цели были проведены исследования (выполнены В. Б. Самойловым), в которых одновременно оценивались тепловые поля и деформации шпиндельной головки, условия касания в направляющих и форма траектории опорной точки [100].

Для регистрации температур устанавливали восемь хромель-никелевых термопар (рисунок 1.6). Первая, вторая и третья расположены вдоль корпуса шпиндельной головки. Четвертая и пятая термопары измеряли термоЭДС непосредственно около V-образных направляющих, шестая и седьмая – показания температур в передней и задней опорах шпинделя, восьмая - температуры окружающей среды.

На рисунке 1.7 показаны изменения формы траекторий при возвратно-поступательном движении переднего торца шпиндельной головки станка MC12-250 в вертикальной плоскости YZ. Длина траекторий составляла 80 мм – зона обработки. Высокочастотные составляющие траектории не учитывались, так как выявлялось влияние характера траектории на форму обрабатываемых поверхностей в продольном направлении.

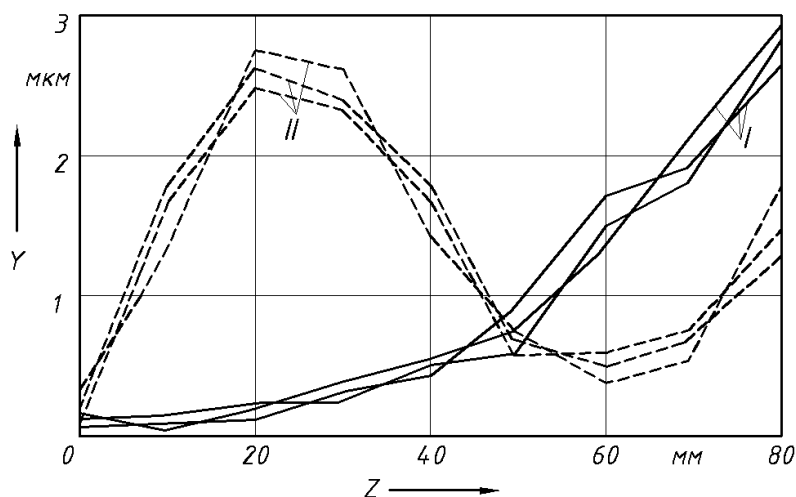


Рисунок 1.7 – Изменение формы траектории шпиндельной головки в зависимости от теплового состояния станка

Исследования были проведены при двух различных состояниях станка. Вначале определялись траектории движения на холостых ходах. Совокупность траекторий I (рисунок 1.7) была получена на холостых ходах (скорость подачи 48 мм/мин, частота вращения шпинделя 45, 710 и 2000 об/мин). Коэффициент детерминации оказался равен 0,9987; коэффициент корреляции 0,9993.

Во второй серии экспериментов определялись траектории движения шпиндельной головки в процессе обработки при следующих условиях: материал заготов-

ки Д16АТ; резец расточной, материал режущей части Т15К6; диаметр растачиваемого отверстия от 40 до 50 мм; припуск от 0,2 до 0,05 мм на сторону; подача 48 мм/мин; частота вращения шпинделя 710 об/мин. Перед проведением данной серии экспериментов станок прогревался в течение 20 минут на частоте вращения шпинделя 2000 об/мин. Как видно из рисунка 1.7 в этом случае регистрируемые траектории П имели совершенно иной характер. Коэффициент детерминации – 0,642; коэффициент корреляции – 0,801. Изменение формы траекторий объяснялось тем, что за время разогрева станка произошло существенное изменение характера его температурного поля (рисунок 1.8).

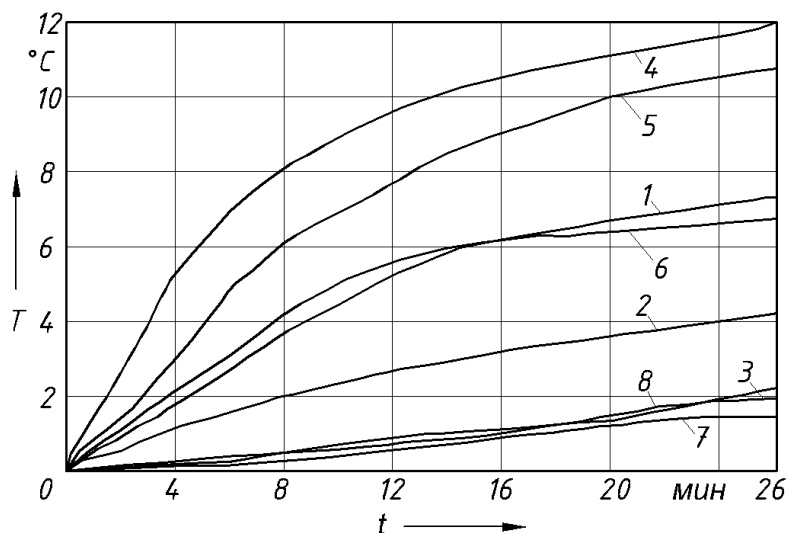


Рисунок 1.8 – Изменение температуры характерных точек шпиндельной головки в процессе стабилизации теплового поля станка

Температура окружающей среды (термопара 8) изменилась незначительно (на 1,5 °C за 20 мин), синхронно с ней изменилась и температура в точках 3 и 7, на поверхности корпуса шпиндельной головки и в задней опоре шпинделя. Градиент температур вдоль корпуса можно проследить по кривым 1, 2, 3 и 6. За 20 минут работы станка он составляет 6 °C. Своего максимального значения температура достигла в зоне направляющих шпиндельной бабки (кривые 4 и 5). Распределение теплоты вдоль направляющих также неравномерно. Это привело к существенным изме-

нениям топографии поверхности направляющих шпиндельной головки, что и определило форму траектории возвратно-поступательного движения шпиндельной головки.

В работах [149, 151] были проведены экспериментальные исследования токарного станка МК-3002 на холостом ходу (рисунок 1.9) и при переменной нагрузке (рисунок 1.4).

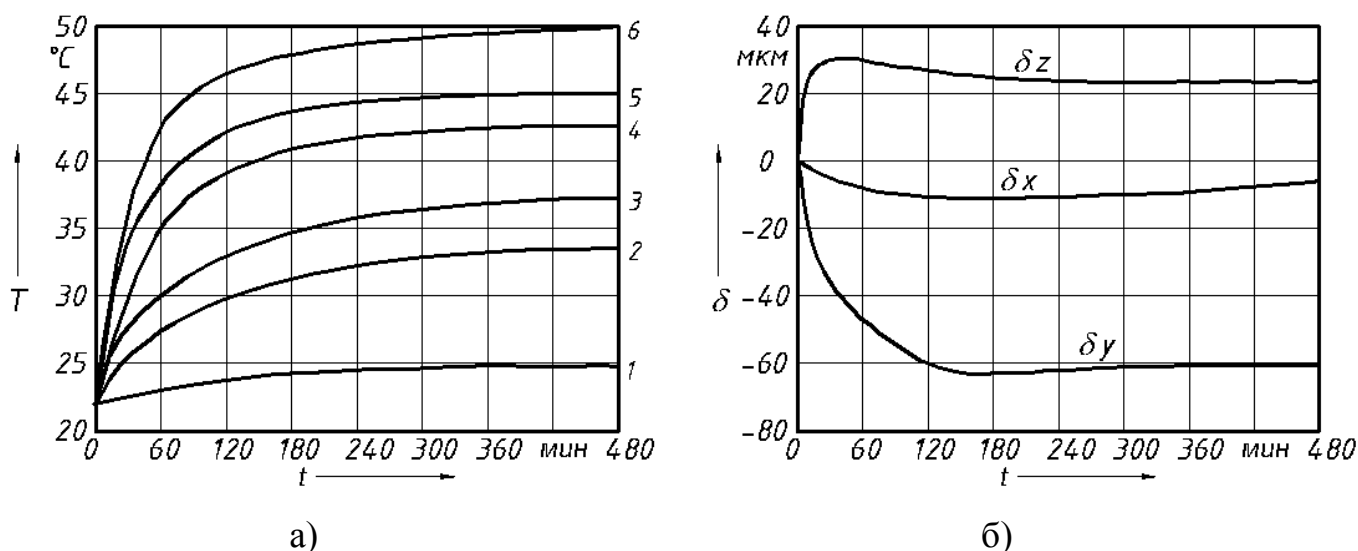


Рисунок 1.9 – Изменение температуры и смещение шпиндельной бабки токарного станка при $n = 1500$ об/мин

Сравнение испытаний позволило автору работы сделать несколько выводов. Температура в точке 6 при работе под нагрузкой на 9°C выше, чем на холостом ходу. Учитывая то, что допустимая норма нагревания наружного кольца подшипника качества составляет 70°C для станков нормальной точности [51], следует признать, что повышение температуры до величины 59°C говорит о незначительной тепловой нагрузке. Однако здесь не следует забывать, что испытания под нагрузкой проводились при непрерывной работе станка на протяжении 6 часов, а такой режим работы в условиях эксплуатации чрезвычайно редко встречается. Изменение теплового смещения шпинделя по оси X при работе под нагрузкой и на холостом ходу мало отличались друг от друга. Считая этот показатель самым главным с точки зрения точности, автор делает заключение, что испытания станка на холостом ходу при оценке его теплоустойчивости вполне соответствуют его испытаниям под нагрузкой.

1.4 Применение САЕ-систем для создания тепловых моделей в станках

Естественным итогом исследований тепловых процессов, протекающих в металлорежущем станке, должна быть математическая модель, позволяющая прогнозировать его тепловое состояние, т.е. тепловая модель.

Автором одной из первых фундаментальных работ, посвященных разработке тепловых моделей станка и отдельных его узлов, является Соколов Ю. Н. [122, 123]. Предложенная им модель сочетает теоретические решения задач теплопроводности с богатым экспериментальным опытом. Наличие большой экспериментальной базы позволило автору в случаях отсутствия теоретических решений вводить коэффициенты, учитывающие недостающие функциональные связи. Разработанная Соколовым Ю. Н. модель при рассмотрении стационарного теплового состояния находит и в настоящее время применение для оценочных расчетов.

Широкое распространение вычислительной техники позволило автоматизировать расчеты и создало благоприятные условия для некоторого усовершенствования предложенной Соколовым Ю. Н. тепловой модели шпиндельного узла. Такое усовершенствование было выполнено Самохваловым Е. И. [20, 30, 113, 114]. Разработанные модели позволяли оценивать установившееся температурное поле и поле тепловых деформаций шпиндельного узла. Тепловая модель, описанная в работе [29] позволяет получить нестационарное температурное поле.

С начала 80-х годов получили развитие численные методы температурных расчетов – метод конечных разностей и метод конечных элементов (МКЭ) с применением достаточно универсальных программ для ЭВМ. Предшественником метода конечных разностей для температурных задач следует считать метод элементарных балансов А. П. Ваничева.

Метод конечных разностей для расчета шпиндельных узлов использовался в работе [105], где приведены результаты расчетов стационарного и нестационарного процессов. При этом был принят ряд упрощений: тепловыделения в подшипниках и коэффициенты теплоотдачи приняты постоянными, влиянием стыков на теплопроводность пренебрегали.

Более широкое применение получил метод конечных элементов в силу своей универсальности. МКЭ – один из основных методов решения задач строительной механики, механики деформируемого твердого тела, теплопроводности, гидромеханики и др. Идея метода заключается в аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью простых элементов, имеющих конечное число степеней свободы и связанных между собой в узловых точках. Например, аппроксимация несущей системы токарного полуавтомата совокупностью простых элементов (тонких пластин и стержней) обеспечивает максимальное приближение расчетной схемы к исходной (рисунок 1.10).

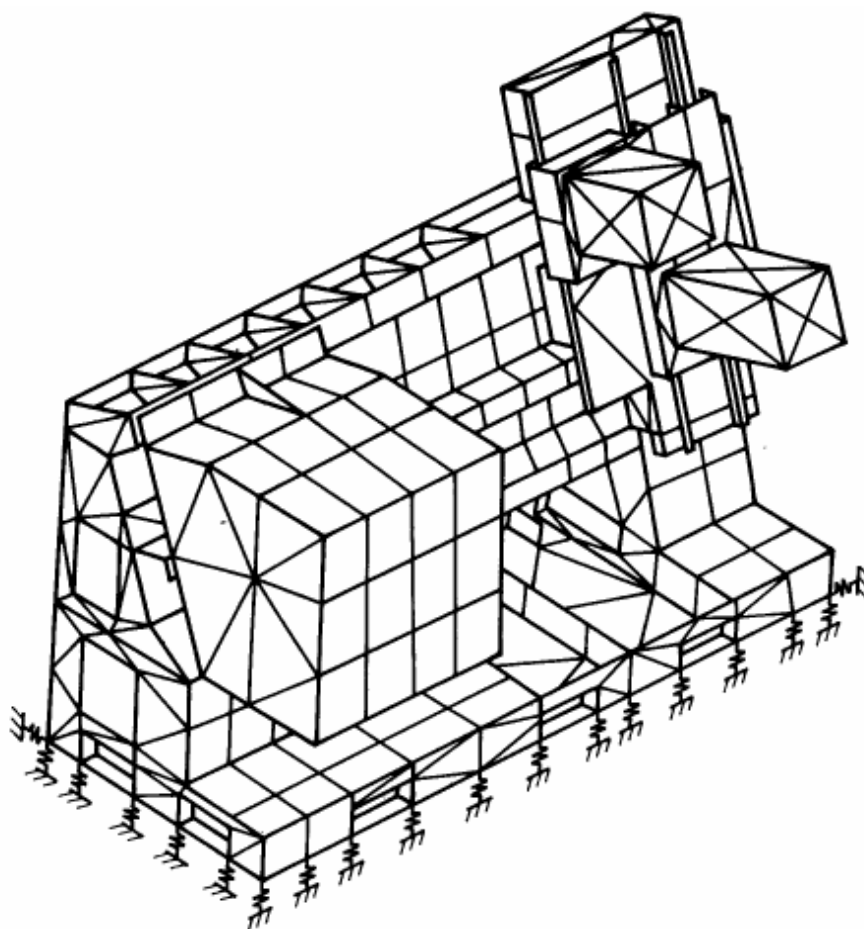


Рисунок 1.10 – Несущая система токарного полуавтомата

В ЭНИМСе и МГТУ «СТАНКИН» была разработана методика автоматизированного расчета стационарных и нестационарных тепловых процессов в шпиндельном узле [20, 118, 138]. Созданы программные комплексы для оценки влияния конструктивных исполнений обычных и высокоскоростных шпиндельных узлов и ре-

жимов их работы. Учтены следующие факторы, не учитываемые в предшествующих работах:

- изменение во времени теплопроводности и теплоемкости материалов, а также условий теплообмена с окружающей средой;
- теплопроводность через стыки в сопряженные детали и узлы;
- учет сложной конфигурации деталей шпиндельного узла;
- зависимость тепловыделения в опорах от типа установленных подшипников, вида смазочного материала, вязкости смазки, закона изменения во времени частоты вращения шпинделя и нагрузки.

В восьмидесятых годах была разработана программа расчетов методом конечных элементов температурных полей и температурных деформаций деталей и узлов станков под руководством А. П. Сегиды [117-119]. С помощью программы проводились расчеты стационарных и нестационарных температурных полей с большей точностью в связи с полным учетом формы деталей, условий теплообмена с окружающей средой, теплового потока, коэффициента теплоотдачи и температуры окружающей среды и их изменения во времени отдельно для каждой граничной поверхности. По полученному температурному полю для заданного момента времени проводят расчет температурных деформаций. В программе автоматизированы основные этапы расчета по МКЭ: дискретизация на конечные элементы, оптимальная нумерация узлов, присвоение и расчет условий однозначности, а также графическое представление результатов расчета. Температурное поле шпиндельного узла, полученное с помощью МКЭ, представлено на рисунке 1.11.

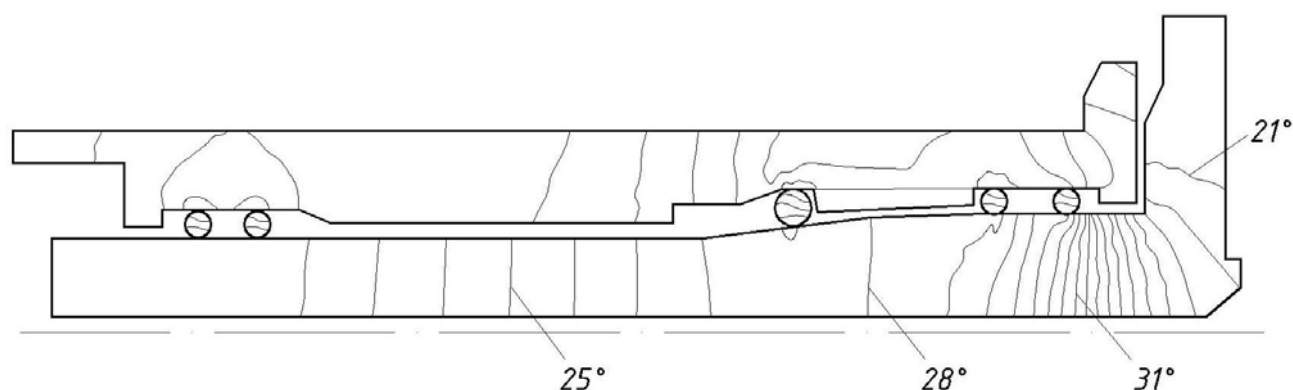


Рисунок 1.11 – Температурное поле шпиндельного узла, полученное с помощью метода конечных элементов

В работах [10, 11] отмечалось, что для оценки влияния теплового режима на точность металлорежущих станков на стадии их проектирования необходимо решить ряд задач, одной из которых является расчет стационарного температурного поля станка. Для реализации этой задачи на языке ФОРТРАН был разработан программный комплекс для ЭВМ СМ-4 в операционной среде РАФОС. С помощью данного комплекса проводился расчет температурного поля станка модели 16K20ВФ1. В качестве исходных данных для основных элементов станка (шпиндельной коробки, станины, основания, каретки, задней бабки, имеющих коробчатую форму) принимались: материал – чугун; толщина стенок от 20 до 30 мм; коэффициент теплоотдачи от 8 до 15 Вт/м²·°С (большие значения – в зоне передней бабки). Для шпинделя были приняты: материал – сталь; коэффициент теплоотдачи 32 Вт/м²·°С. Результаты расчетов избыточных температур станка приведены на рисунке 1.12. На этом же рисунке в скобках отмечены результаты экспериментальных исследований температурного поля станка. Было получено удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента, максимальная относительная ошибка не превысила 30 %.

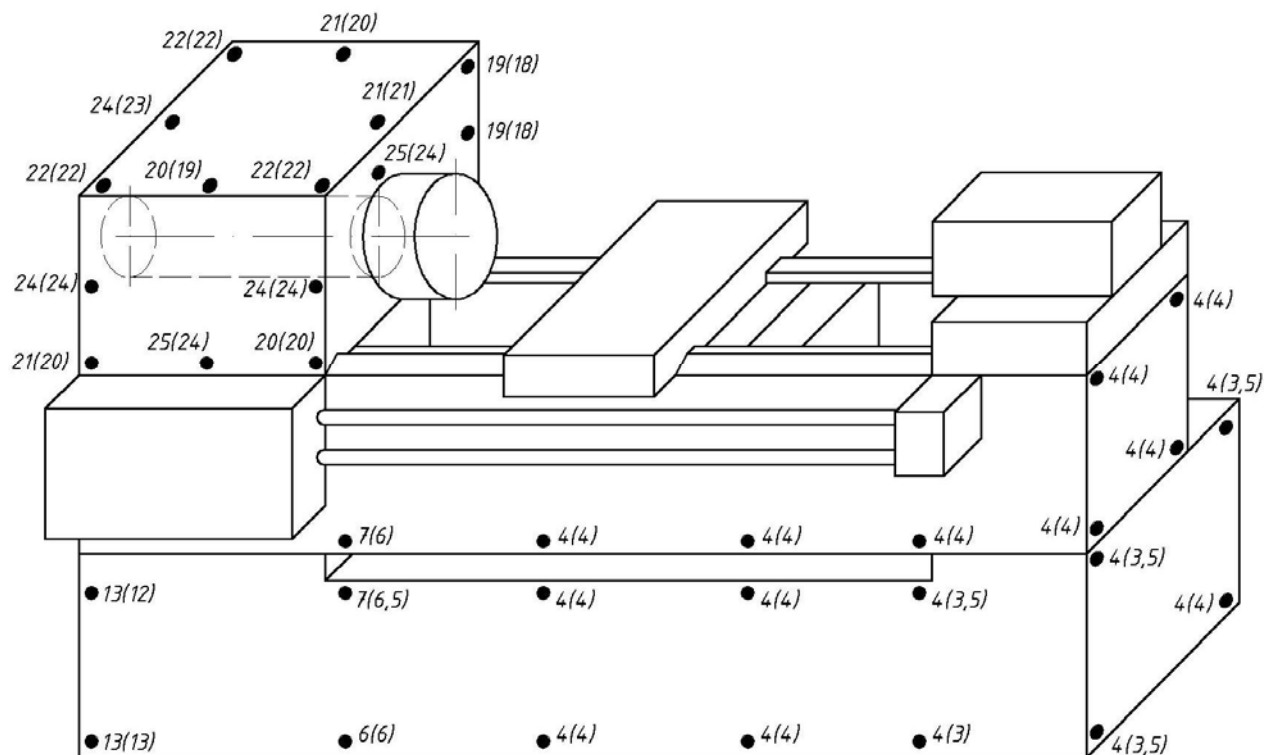


Рисунок 1.12 – Температурное поле токарного станка 16K20ВФ1

Основным направлением современного моделирования является широкое использование конечно-элементного представления несущей системы станка, причем как с использованием уникальных авторских разработок, так и с использованием универсальных автоматизированных систем, например ANSYS, NASTRAN, Abaqus. В работе [156] рассматривается применение CAE-системы ANSYS для теплового моделирования шпиндельного узла на опорах качения. Результаты численного моделирования сопоставляются с результатами натурного эксперимента, на основе чего делается вывод о возможности использования полученной конечно-элементной модели для определения с хорошей точностью (~5 %) тепловых характеристик шпиндельного узла станка. В работе [173], посвященной анализу погрешностей позиционирования обусловленных тепловыми деформациями привода подач станка, вместе с другими методами моделирования рассматривается МКЭ. Программной реализацией метода в данном случае выступает CAE-система Abaqus. Система используется для моделирования тепловых деформаций системы направляющих в конструкции привода подач. Эффективность полученной модели подтверждается результатами натурных экспериментов (абсолютная погрешность модели составила 3,79 мкм). Работа [174] также посвящена тепловому анализу привода подач обрабатывающего центра. Фокусом работы является сравнительный анализ температурной погрешности шарико-винтовой пары (ШВП), полученной в ходе численного и натурного экспериментов при различных значениях подач. Для численного моделирования ШВП используется CAE-система ANSYS. Расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными составило 10,8 % при максимальной подаче 20 м/мин и 2 % при минимальной подаче 10 м/мин.

В работе [158] рассмотрен термдеформационный анализ высокоскоростного токарно-фрезерного обрабатывающего центра вертикальной компоновки CX8075 производства Anyang Xinsheng Machine Tool Col., Ltd. Максимальная частота вращения вертикального шпинделя составляет 12000 об/мин, частота вращения планшайбы – 800 об/мин. В качестве CAE-системы использована система Ansys. Рассмотрено температурное поле в стационарной постановке. Расчет тепловых деформаций произведен на максимальной частоте вращения шпинделя. В работе [159]

представлен метод исследования характеристик высокоскоростного электрошпинделя обрабатывающего центра вертикальной компоновки CX8075 с использованием CAE-системы Ansys. Особенностью модели являлся учет контактного взаимодействия в опорах с использованием встроенного конечного элемента COMBIN14. Максимальная расчетная величина температурных перемещений шпинделя составила 6,56 мкм – оказалось существенно меньше требуемого уровня обеспечиваемой размерной точности. На рисунке 1.13 приведены результаты теплового расчета шпиндельного узла. Максимальный уровень нагрева на передней шейке шпинделя находился в диапазоне от 60 °С до 70 °С.

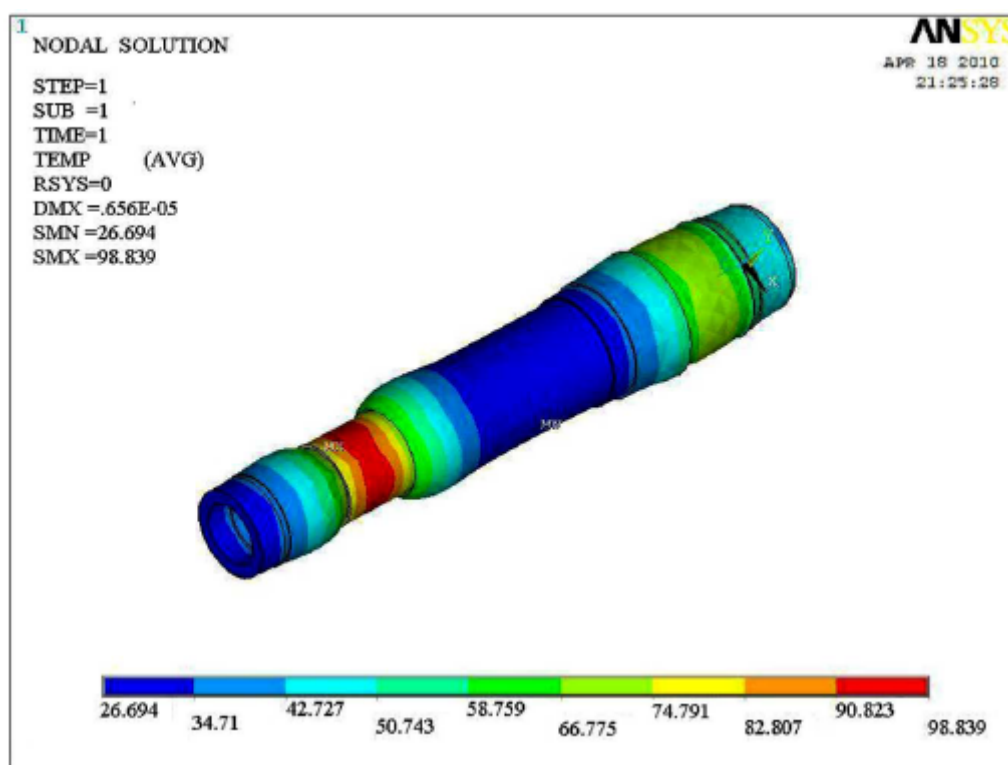


Рисунок 1.13 – Результаты теплового расчета шпиндельного узла в Ansys

Моделирование осесимметричных конструкций станка выполняется с использованием кольцевых [62, 106, 118, 135, 136], стержневых и радиальных конечных элементов [107]. Моделирование деталей несущей системы станка выполняется как решением плоской задачи, с использованием пластинчатых конечных элементов, так и объемной задачи, в которой используют призматические конечные элементы и тетраэдр [59, 63, 64, 66, 67, 112, 117, 119].

В работе [54] был выполнен анализ конструкции, условий теплообмена и закрепления узлов, который позволил представить термодформационную систему торцешлифовального станка 3А343АДФ2 в виде расчетной схемы. Схема состояла из следующих групп узлов: Шпиндельный узел, включающий в себя шпиндель, подшипники и пиноль; корпус шпиндельной бабки, состоящий из двух частей; корпус станины с тумбой. Конечно-элементная модель станины станка содержала 599 узловых, 150 треугольных и 384 прямоугольных пластинчатых конечных элементов. Время счета базового варианта на ЭВМ ЕС 1045 составляло около 1 час 30 мин. Для вычислений деталей несущей системы станка использовался программный комплекс КИПР-ЕС [59, 108, 112], для шпиндельного узла – ранние версии авторского программного комплекса TEMOS [62, 136].

1.5 Современные системы компенсации температурной погрешности в станках

По данным фирмы Kitamura в высокоэффективных фрезерных центрах высокая и стабильная точность обработки поддерживается применением ряда устройств и технических решений. Стабильность температуры основных рабочих органов поддерживается внутренней циркуляцией охлаждаемого масла или воздушно-масляной смеси (в зависимости от узла), и ее отклонение не превышает 1 °С, что допускает использование станка в трехсменном режиме работы. Кроме этого, специальная адаптивная система контроля и компенсации тепловой погрешности, состоящая из датчиков и системы слежения, позволяет автоматически обнаружить и компенсировать температурные расширения станины величиной до 5 мкм путем внесения соответствующей коррекцией в УЧПУ станка [157].

Учет температурных перемещений станка на различных этапах его жизненного цикла позволяет повысить степень точности обработки детали не менее чем на два – три квалитета. Например, один из лидеров мирового станкостроения фирма «OKUMA» (Япония) разработала и запатентовала «термо-дружественную»

(“Thermo-Friendly-Concept”) концепцию конструирования прецизионных станков [166, 171]. Основываясь на этой концепции станки фирмы, сохраняют высокую точность даже в условиях отсутствия термоконстантных помещений. Например, вертикальный обрабатывающий центр MB-46VA, созданной по данной концепции гарантирует размерную точность обработки менее ± 10 мкм в течение непрерывной восьмичасовой работы станка. При этом колебания температуры окружающей среды допускаются в пределах 8 °С. Температурные отклонения шпинделя по осям Y и Z в условиях повторно-кратковременного режима работы станка представлены на рисунке 1.14.

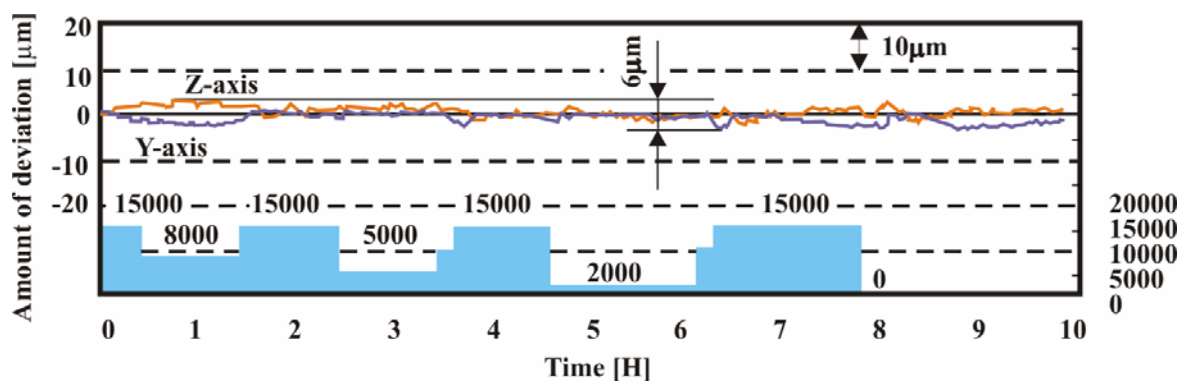
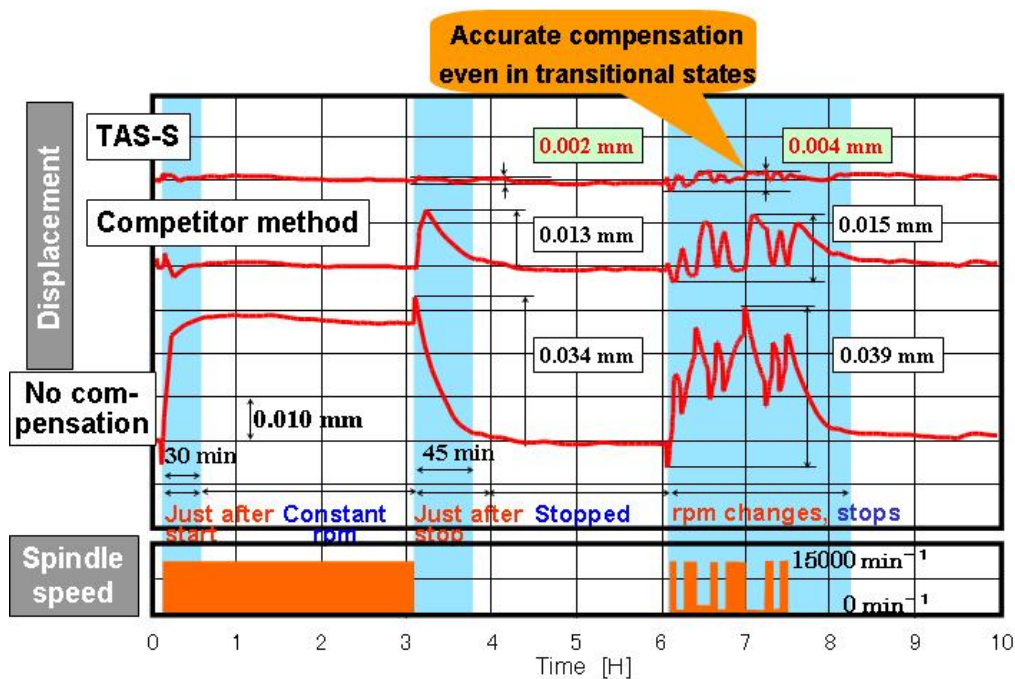


Рисунок 1.14 – Температурные отклонения шпинделя в условиях повторно-кратковременного режима работы станка

Дополнительно для обеспечения размерной точности обработки в пределах ± 2 мкм в станках фирмы OKUMA используется активная система стабилизации температурных деформаций шпинделя TAS-S. Основными функциями системы TAS-S является: формирование фактического состояния температурного поля шпинделя, на основе данных от установленных на станке термодатчиков; прогнозирование и компенсация возникающих в шпинделе тепловых потоков. На рисунке 1.15 приведены результаты натурных экспериментов, показывающие эффективность использования системы стабилизации TAS-S в условиях повторно-кратковременной работы станка: три часа непрерывной работы станка на частоте 15000 об/мин; три часа простоя станка; в течение последующих 90 минут станок работал в повторно-кратковременном режиме с изменением частоты вращения шпин-

деля в диапазоне от 0 до 15000 об/мин.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что без использования любых методов температурной компенсации даже для прецизионных станков фирмы OKUMA тепловые деформации существенно превышают 5-ти микронную отметку.



No compensation - без применения температурной компенсации;

Competitor method - с использованием других конкурентных методов;

TAS-S - с использованием активной системы компенсации температурных деформаций шпинделя

Рисунок 1.15 – Экспериментальные характеристики температурных перемещений

В работе [172] показано использование нейросетевого подхода к прогнозированию характеристик температурных перемещений по измеренным температурам. В качестве объекта исследования использован пятиосевой фрезерный станок с ЧПУ. Был разработан алгоритм компенсации температурной погрешности. Проведена его проверка при обработке двух одинаковых деталей. Первая деталь обрабатывалась без алгоритма компенсации температурной погрешности, а вторая – с использованием алгоритма. Было показано, что удалось сократить температурную погрешность с 75 мкм до 16 мкм.

В работах [162, 163] рассмотрен подход к определению компенсирующих воздействий для приводов подач на станках с ЧПУ, основанный на применении численных методов к расчету теплового и термодформационного состояний несущей системы станка. Для расчета нестационарного теплового состояния НСС использован метод конечных разностей, а для расчета температурных смещений использован метод конечных элементов. Такой метод авторы называли – The Finite Difference Element Method и в англоязычной аббревиатуре FDEM – в отечественной литературе такое название не встречается. Специфической особенностью модели является то, что расчет выполняется для пространственного положения некоторой фиксированной точки инструмента, авторы называли ее как «tool centre point (TCP), т.е. центральная точка инструмента». Полученные значения выступают в качестве корректирующих воздействий для соответствующих координатных приводов подач. На рисунок 1.16 представлена условная схема реализации предложенного подхода. Измерения проводятся только для задания граничных условий в задаче теплопроводности.

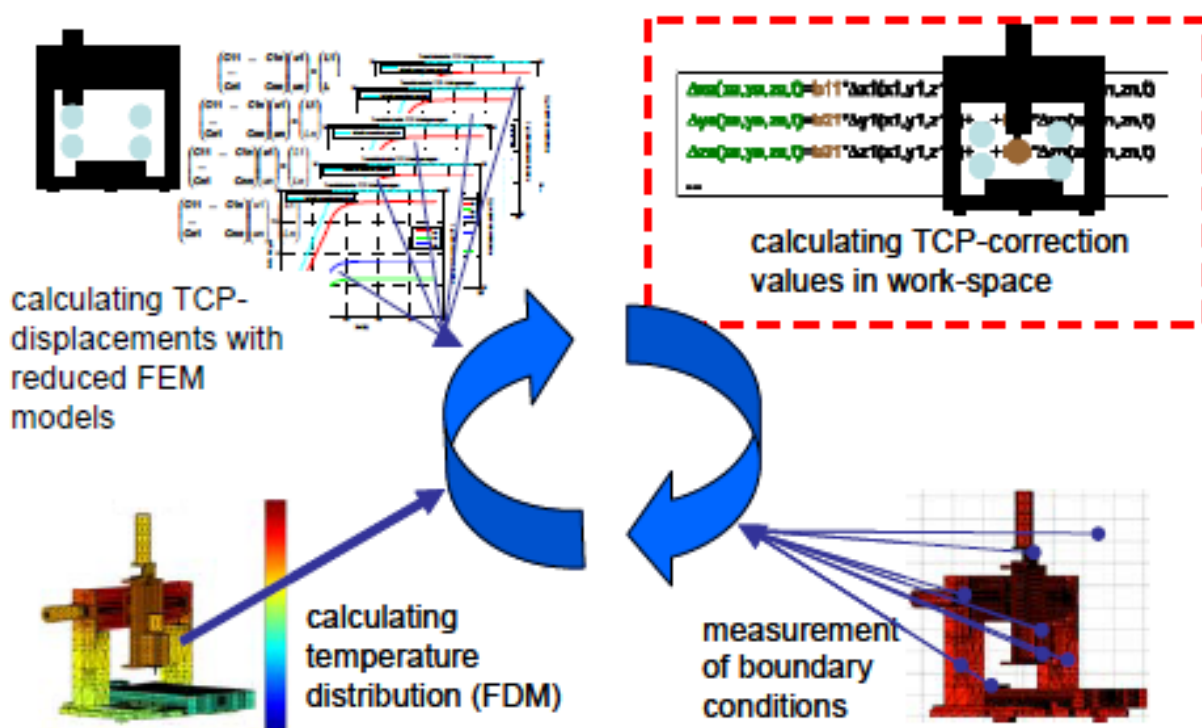


Рисунок 1.16 – Схема формирования компенсирующих воздействий по методу FDEM

В работе [155, 161] рассмотрен новый метод для компенсации температурной погрешности в станках основанный на системе тепловых передаточных функций. Этот метод позволяет выполнять вычисления в режиме реального времени для выполнения компенсирующих воздействий для центральной точки инструмента. Принципиальная схема реализации системы компенсации температурной погрешности, основанной на методе тепловых передаточных функций, приведена на рисунке 1.17. На рисунке три окружности А обозначают тепловые источники; возле каждого источника установлены термодатчики – В. Коэффициенты теплоотдачи измеряется в режиме реального времени. Температура окружающей среды также измеряется датчиком.

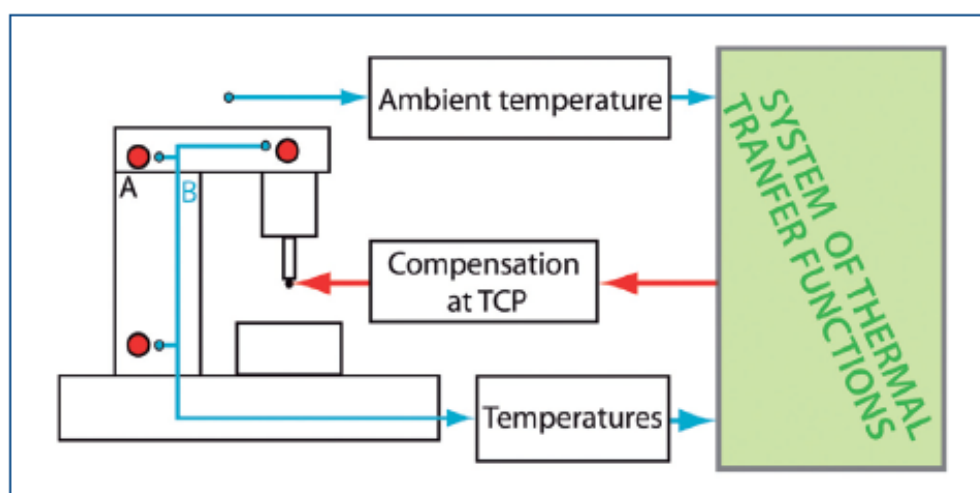


Рисунок 1.17 - Принципиальная схема реализации системы компенсации температурной погрешности, основанной на методе тепловых передаточных функций

Процедура сборки и обработки данных выполняется с использованием системы MATLAB. На первом этапе проводится натурный эксперимент. На втором этапе выполняется процедура обработки данных. На третьем этапе несколько тепловых передаточных функций идентифицируются с использованием пакета расширения Identification Toolbox. На четвертом этапе выполняется построение модели перемещений в Simulink. Расчет перемещений выполняется по каждой координатной оси в режиме реального времени. Рассчитанные значения коррекций обрабатываются системой управления станка с использованием программируемого логического кон-

троллера (PLC). На рисунке 1.18 приведена схема выполнения компенсации температурных перемещений в системе управления станка.

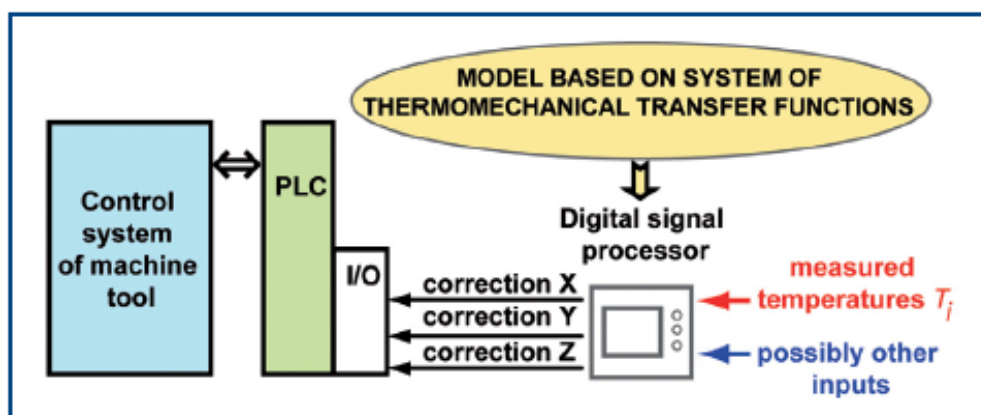


Рисунок 1.18 – Схема выполнения компенсации в системе управления станка

Применимость и устойчивость метода была экспериментально проверена на горизонтально-фрезерном станке с ЧПУ, оснащенный системой ЧПУ 840 DSL. Результаты натурного эксперимента показали, что при использовании разработанного метода достигается сокращение температурной погрешности станка на 85 % больше по сравнению с традиционным алгоритмом, основанным на построении линейной регрессионной модели «перемещение-температура».

В работах [167, 168] выполнен обзор достижений в области компенсации погрешностей различных типов, возникающих на станках. Рассмотрены погрешности геометрические, вызванные силами резания, установочные и температурные. В области компенсации температурных погрешностей была представлена работа, в которой представлены результаты разработанной системы компенсации для многоцелевого двухпозиционного станка вертикальной компоновки, оснащенного двумя шпиндельными узлами. Система компенсации состояла из компьютера IBM, интерфейсного модуля с четырьмя различными интерфейсными платами и программного обеспечения модели погрешности (рисунок 1.19). Данные из станка касающиеся положения осей, значений температуры, длины и количества инструмента и т.д. были поданы в различные интерфейсные платы. Для выполнения компенсации температурной погрешности станка использовались специально разработанные две системы

аппаратного обеспечения. Квадратурная коррекция использована для прерывания работы датчика положения в цепи обратной связи и для сложения или вычитания квадратурных импульсов при выполнении необходимой компенсации. Значение скомпенсированной погрешности посылалось на адрес ввода/вывода ЧПУ, что вызывало смещение исходного положения инструмента во время резания.

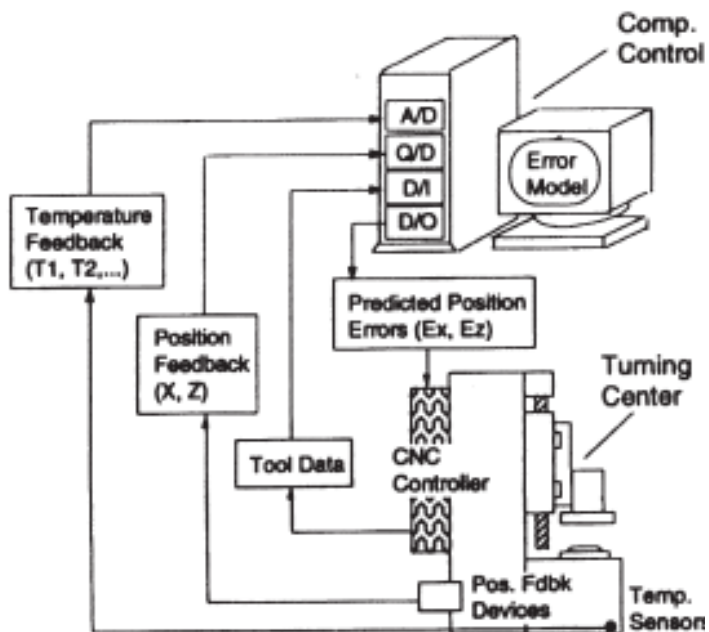


Рисунок 1.19 – Система управления компенсации погрешностей, работающая в реальном времени

Для проверки эффективности разработанной системы компенсации были выполнены серии испытаний станка под нагрузкой. Результаты измерений с помощью лазерного интерферометра показали, что 90 % погрешностей станка было исправлено.

В работе [170] показан способ расчета температурной погрешности для компоновки станка, в которой важны не только линейные удлинения шпинделя, но и тепловые угловые деформации (рисунок 1.20).

На рисунке 1.21 представлены экспериментальные функции «перемещение – температура» $\delta(T)$ для двух координат Z и Y , характеризующихся максимальными температурными перемещениями для испытанного станка. Авторы выдвинули гипотезу, что сложный характер функций $\delta(T)$ вызван температурным изгибом, возникающим в шпиндельной головке станка. Реализация компенсирующих воздействий

только по одной координате Z (вдоль шпинделя) позволила почти на 60 % сократить температурную погрешность станка. Для сокращения погрешности, обусловленной изгибом, в работе предложены математические модели температурной погрешности, основанные на несложных геометрических построениях, учитывающих особенности компоновки НСС.

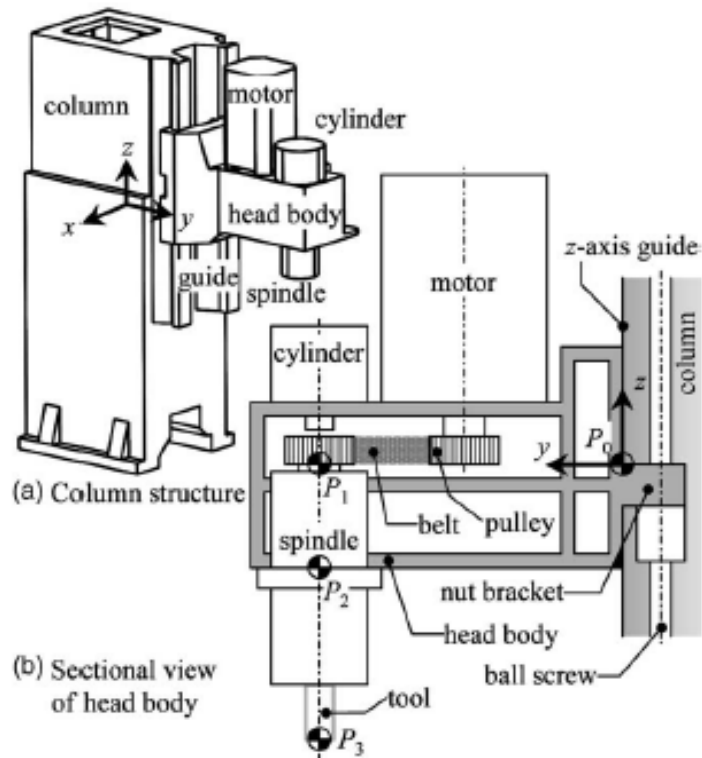


Рисунок 1.20 – Элементы несущей системы исследованного обрабатывающего центра

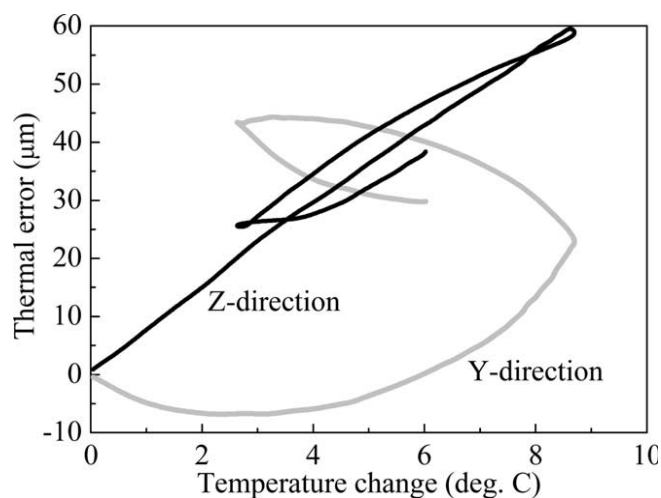


Рисунок 1.21 – Результаты натурального эксперимента

2 Экспериментальные исследования термодформационного состояния металлорежущего станка

2.1 Методика проведения экспериментов

Качество экспериментальной информации определяется достоверностью экспериментальной информации, устанавливаемой чистотой проведения эксперимента и техническими характеристиками измерительной аппаратуры. Важнейшими техническими характеристиками являются: тепловая инерция термодатчиков, дискретность измерений, абсолютная точность измерений. Полнота экспериментальной информации устанавливается: временем тепловых испытаний, обычно сопоставляемых со временем температурной стабилизации станка; дискретностью (во времени) проведения измерений температур и температурных перемещений; полнотой охвата температурного поля станка термодатчиками; программой тепловых испытаний.

Несмотря на большой накопленный опыт проведения тепловых испытаний в станках, первичному анализу экспериментальных характеристик уделялось очень малое внимание [132, 133, 150, 154]. В основном, анализ экспериментальных характеристик сводился к установлению следующих параметров: времени температурной стабилизации; уровням нагрева и достигнутых температурных перемещений по координатным осям. Вместе с этим, подробный анализ экспериментальных характеристик станка точно указывает направление принятия решений по термостабилизации станка.

Для исследований переменного термодформационного состояния станка был выбран фрезерно-сверлильный станок высокой точности Deckel FP3 (Германия). Испытания проводились с помощью разработанного испытательно-диагностического комплекса, представленного на рисунке 2.1.

В качестве измерительной аппаратуры использовались цифровой многоканальный измеритель температуры МИТ-12ТП-11 [19, 35, 37]. Цифровой прибор оснащен интерфейсом RS-232, поэтому все данные в режиме реального времени пере-

давались в компьютер [34, 36]. Цифровой измерительный прибор предназначен для проведения высокоточных измерений температуры при помощи термоэлектрических преобразователей по 12-ти каналам, представления информации по каждому каналу на цифровом дисплее прибора и передачи измеренных значений на ЭВМ. В нём полностью исключено влияние каналов друг на друга за счет применения в качестве коммутирующих устройств миниатюрных электромагнитных реле.

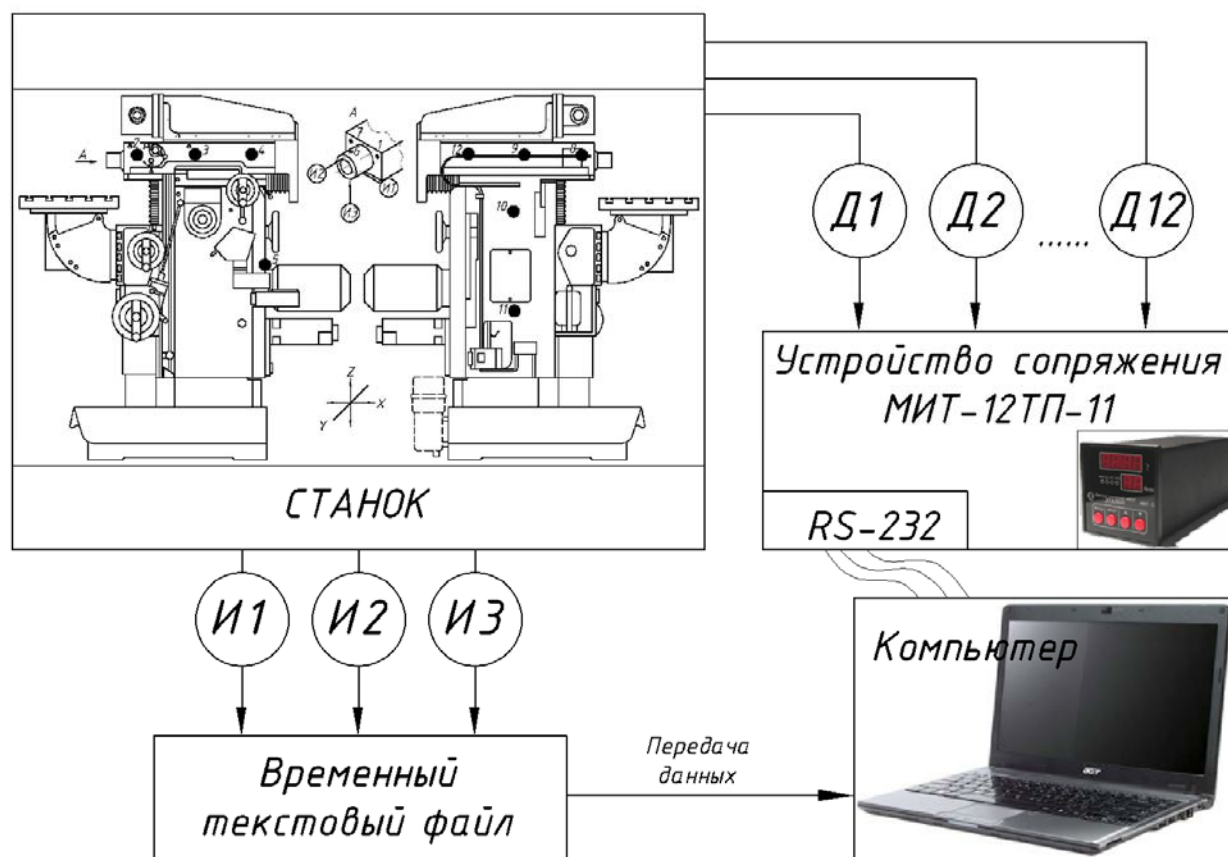


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема реализации
испытательно-диагностического комплекса

Прибор обеспечивает работу в двух основных режимах – измерения и установки конфигурации. В процессе считывания данных из памяти прибора информация помещается в таблицу основного окна программы. С помощью программы обслуживания МИТ-12 возможно изменять параметры вывода данных в таблицу [98]. В автоматическом режиме измерения при скорости переключения между каналами

более одной секунды в соответствующие ячейки таблицы выводятся среднее, максимальное, минимальное либо последнее измеренное значение температуры за соответствующий период. Также необходимо указывать какое из значений необходимо выводить в таблицу: среднее, максимальное, минимальное или последнее значение. С помощью программы обслуживания МИТ-12 возможно сохранять данные в файле, который может быть обработан любыми стандартными средствами, позволяющими работать с текстовыми файлами.

Для измерения температурных перемещений использовались многооборотные индикаторные головки типа МИГ ГОСТ 9696-75 класса точности 0, которые закреплялись в магнитные штативы типа ШМ – ПН, устанавливаемый на столе станка, а ножка индикаторной головки упиралась в неподвижную гильзу шпиндельного узла станка (станок Deckel FP3 гильзового исполнения). 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 повторнократковременного режима работы станка; суточным изменением температуры окружающей среды и изменением температуры технической среды в результате разогрева шпинделя во времени.

Общий вид станка в условиях натурального эксперимента приведен на рисунке 2.2. Предварительно проведенная серия натуральных экспериментов выявила, что для данного станка наиболее нагретыми являются поверхности несущей системы станка вблизи электродвигателя привода главного движения и шпиндельных опор. Для получения более полного представления о тепловом состоянии станка была выполнена серия тепловых испытаний, которая превысила 200 часов [36, 38, 39, 85-87, 90, 93]. В основном, длительность каждого испытания станка составляла от 300 до 480 минут. Исследования проводились в различное суточное и сезонное время, при широком диапазоне начальных температур станка, от 13 °С до 28 °С.



Рисунок 2.2 – Общий вид станка в натурном эксперименте

На рисунке 2.3 показана схема установки термодатчиков и индикаторных головок. Согласно схеме 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. Индикаторные головки устанавливались в трех точках по трем координатам, с учетом, 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; 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 [76, 84].

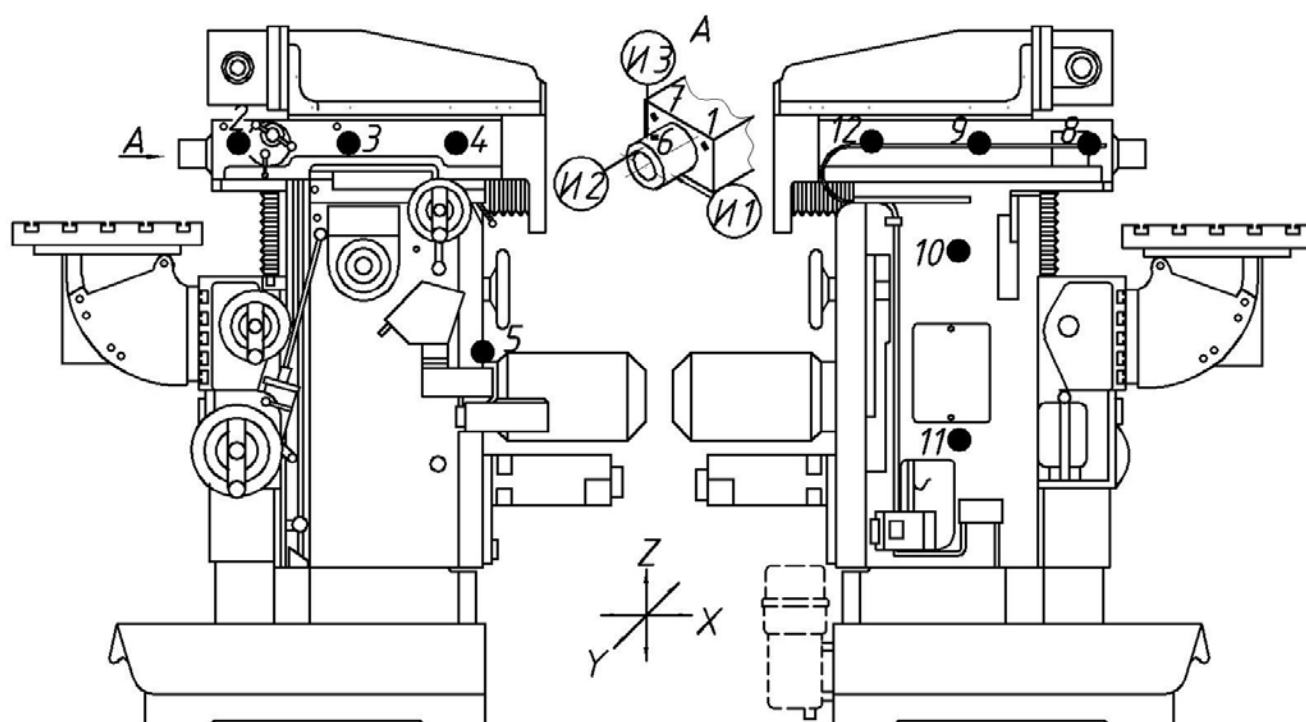


Рисунок 2.3 – Схема установки термодатчиков и многооборотных индикаторных головок на станке Deckel FP3

Экспериментальные исследования термдеформационного состояния фрезерно-сверлильного станка высокой точности Deckel FP3, работающего на холостом ходу проводились по следующей программе:

- непрерывный режим работы;
- режим нагревание – остывание;
- переменный режим работы.

Экспериментальные температурные характеристики (в дальнейшем – ТХ) и характеристики температурных перемещений (в дальнейшем – ХТП) представлены средними значениями экспериментальных реализаций. Это объясняется тем, что, несмотря на относительно небольшую дисперсию экспериментальных данных в серии экспериментов, наличие этой дисперсии существенно затрудняло визуальное представление температурного поля станка, ввиду достаточной плотности экспериментальных температурных характеристик станка, полученных в различных точках.

2.2 Серия испытаний в условиях непрерывного режима работы

Непрерывная работа станка на одной частоте выполнялась для получения «оценки сверху» - предельных значений температур и температурных перемещений. Тепловые испытания проводились в условиях непрерывной работы на одной частоте вращения шпинделя: 800, 1000, 1250, 1600 и 2000 об/мин [38, 39, 90]. На рисунках 2.4 – 2.8 представлены экспериментальные тепловые характеристики фрезерно-сверлильного станка Deckel FP3.

На рисунках 2.4а и 2.4б показаны ТХ и ХТП на частоте вращения 800 об/мин. Их анализ показывает, что уровень избыточных температур за пять часов непрерывной работы на различных поверхностях станка составил в диапазоне от 4 °С до 10,8 °С. Тем не менее, из экспериментальных ТХ, время температурной стабилизации станка – не зафиксировано. Вместе с этим характер стабилизации ХТП несколько отличается от ТХ. По оси Х перемещения не превысили 2,5 мкм, с четко выраженной стабилизацией после двух часов работы. По осям Y и Z даже после пяти часов непрерывной работы, уверенности в стабилизации температурных перемещений не было.

Анализ ТХ показывает, что уровень избыточных температур за пять часов непрерывной работы в условиях непрерывного режима работы на разных экспериментах составил в диапазоне от 4 °С до 12 °С. Время температурной стабилизации станка фиксировалось только на двигателе (датчик №5) после 1,5 часов его работы. По остальным датчикам температурная стабилизация не фиксировалась. Анализ показал, что наибольший нагрев отмечался на поверхности гильзы, в месте установки передней опоры шпинделя и на поверхности станка находящейся в непосредственной близости от главного двигателя.

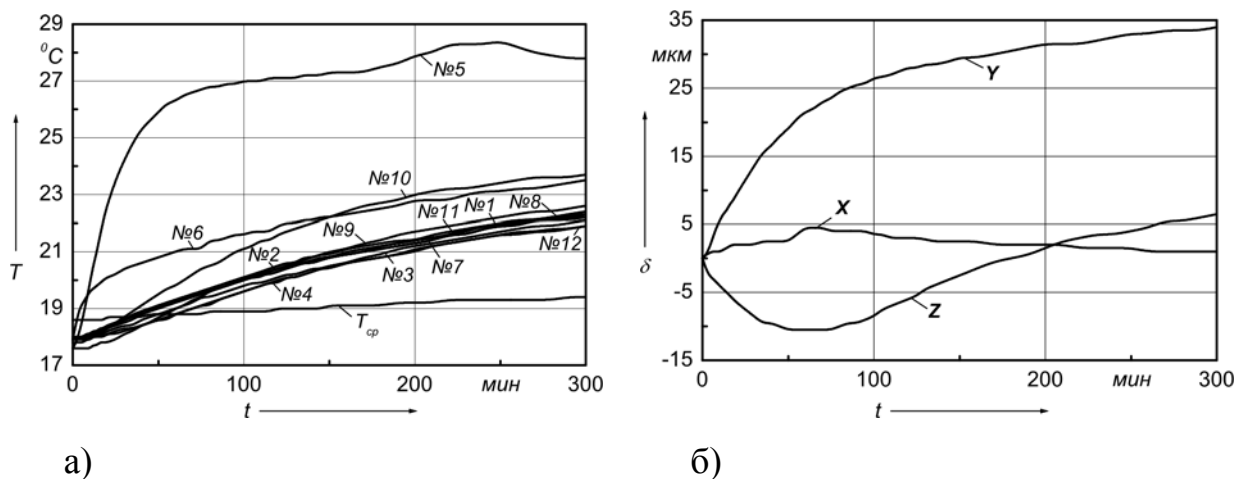


Рисунок 2.4 – Тепловые характеристики станка в условиях непрерывного режима работы на частоте 800 об/мин

Характер стабилизации ХТП отличается от ТХ. В условиях непрерывного режима работы станка стабилизация температурных перемещений фиксировалась по оси Y после 2,5 - 3 часов непрерывной работы, на частоте вращения шпинделя 800 об/мин составила – около 34 мкм, на 1250 об/мин – 39 мкм, на 1600 об/мин – 46 мкм и на 2000 об/мин – почти 53 мкм. Также фиксировалась стабилизация температурных перемещений по оси X и составляла примерно 5 мкм. По оси Z стабилизация не наблюдалась и температурные перемещения при непрерывном режиме, составляли около 10, 13, 15, 20 и 29 мкм.

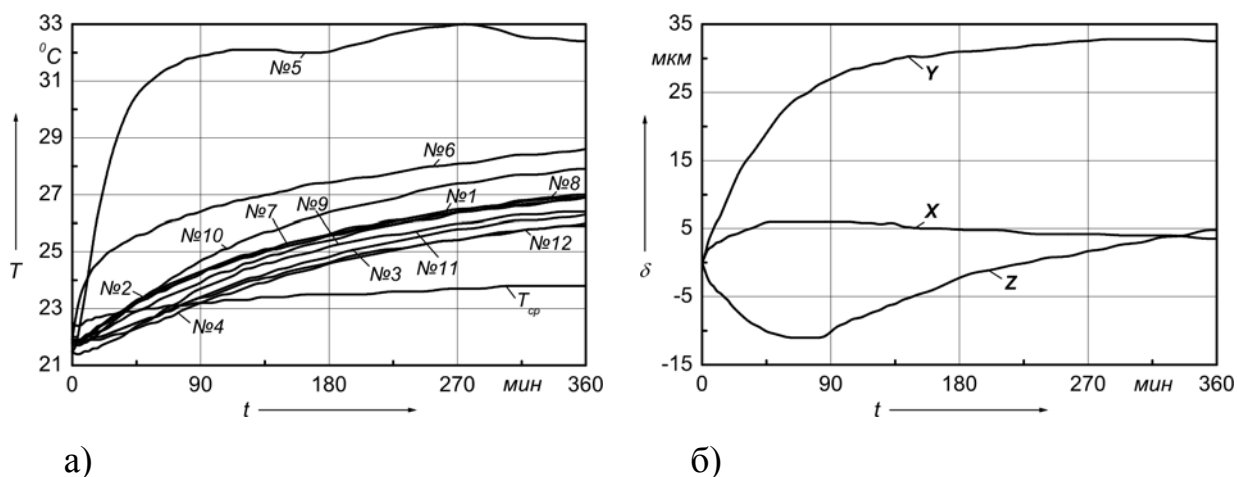
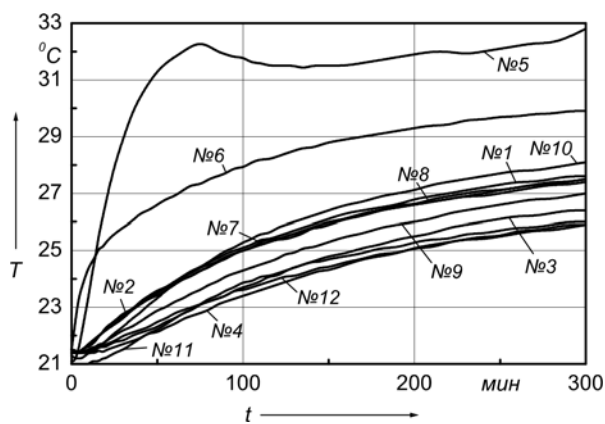
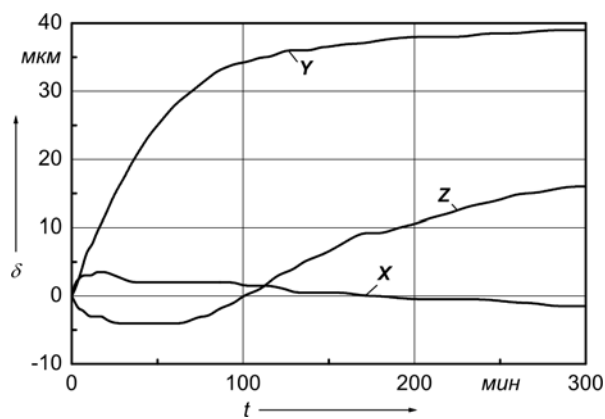


Рисунок 2.5 – Тепловые характеристики станка в условиях непрерывного режима работы на частоте 1000 об/мин

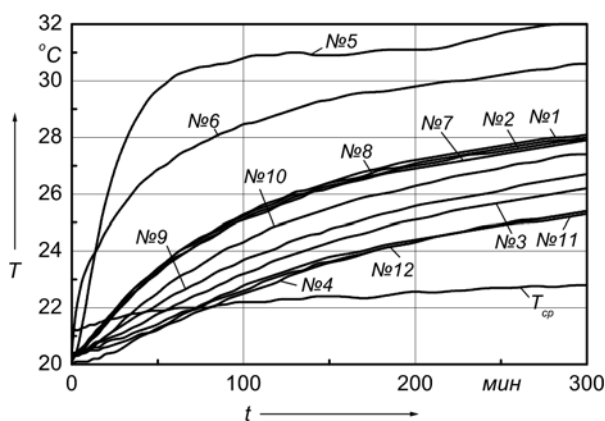


а)

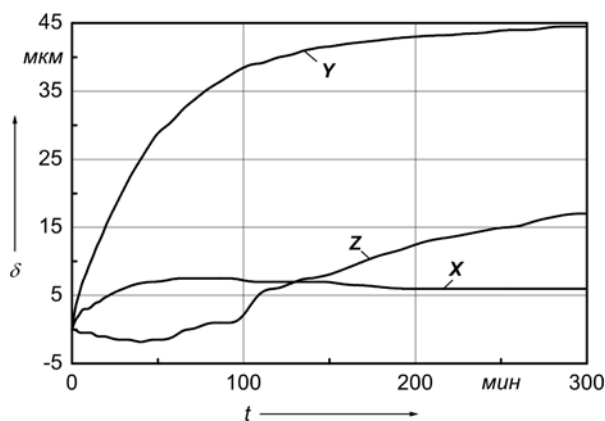


б)

Рисунок 2.6 – Тепловые характеристики станка в условиях непрерывного режима работы на частоте 1250 об/мин

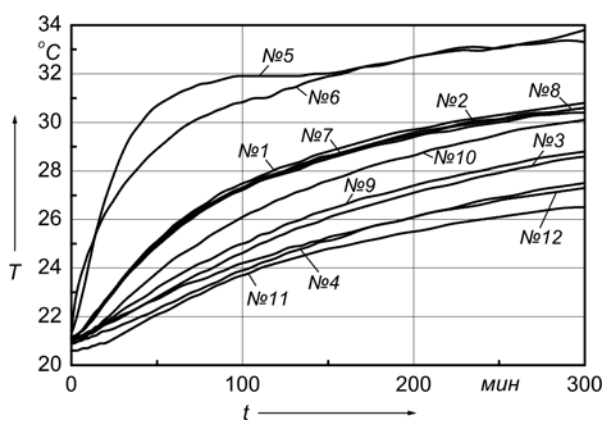


а)

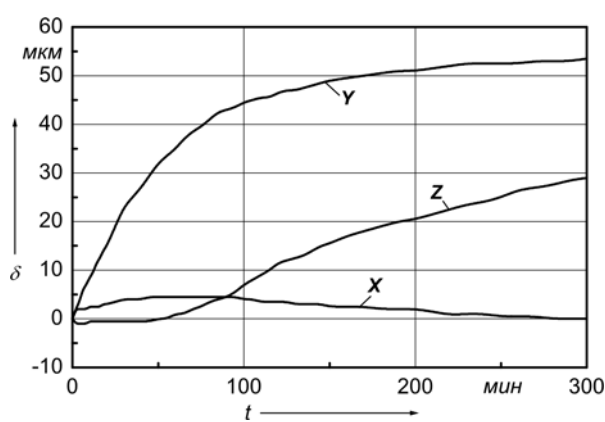


б)

Рисунок 2.7 – Тепловые характеристики станка в условиях непрерывного режима работы на частоте 1600 об/мин



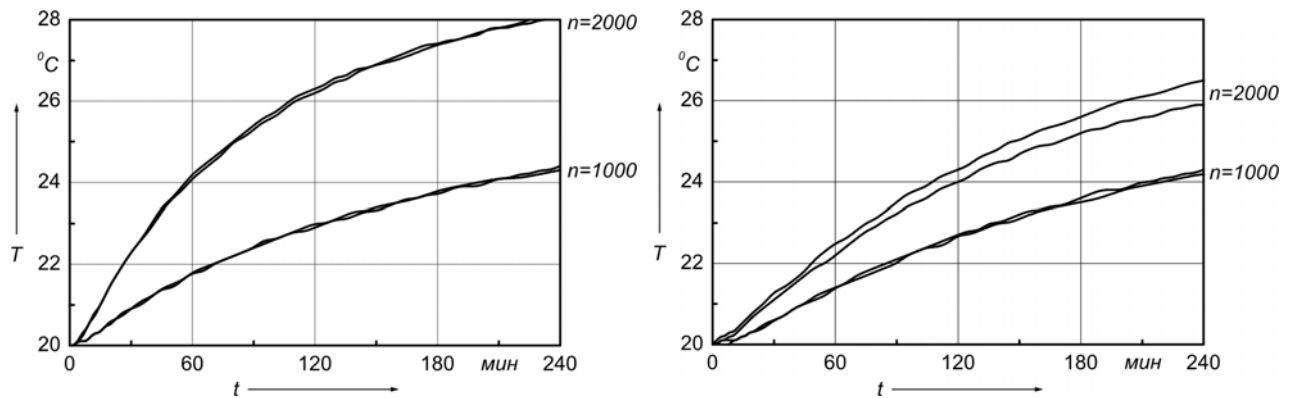
а)



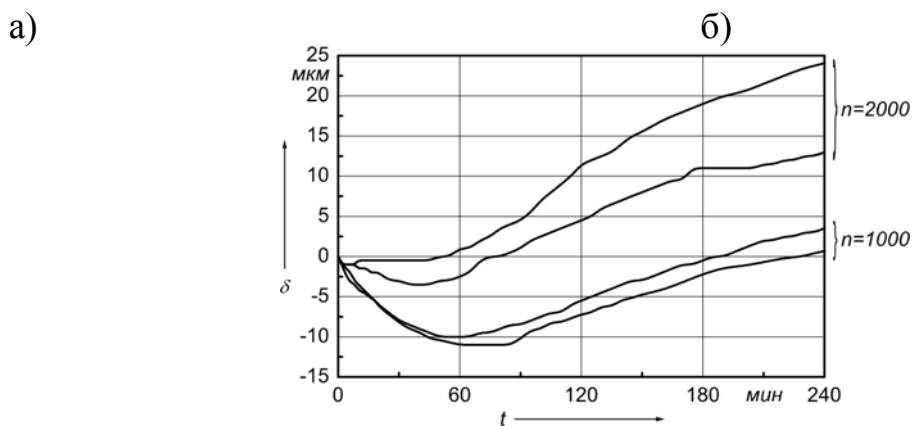
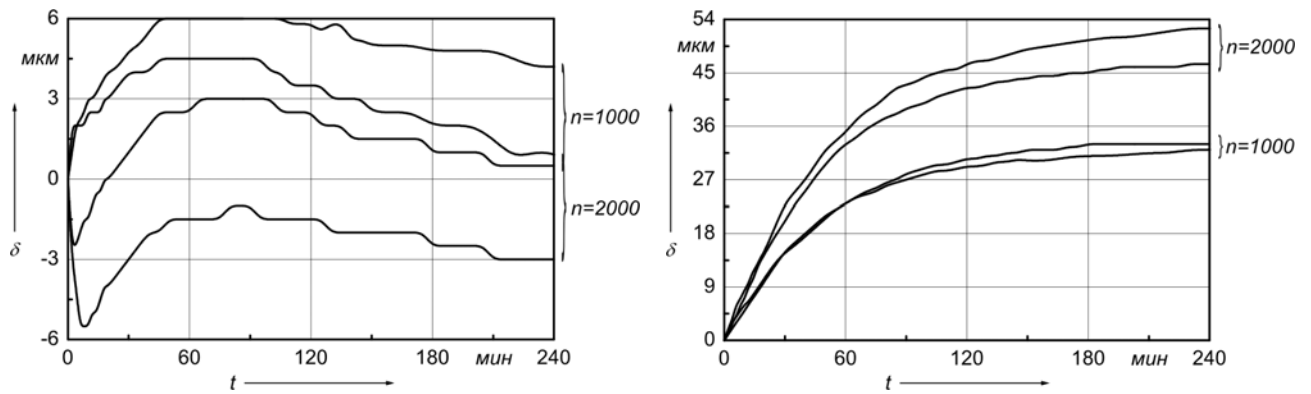
б)

Рисунок 2.8 – Тепловые характеристики станка в условиях непрерывного режима работы на частоте 2000 об/мин

Для оценки погрешности полученных экспериментальных результатов на рисунках 2.9 и 2.10 приведены по две «предельных» характеристик, позволяющие оценить фактический разброс экспериментальных данных, как для температур, так и для перемещений. На рисунке 2.9а и 2.9б приведены ТХ для термодатчиков №2 и №9, установленных на шпиндельной бабке станка, ближе к передней и задней опорам шпинделя, соответственно.



а) б)
Рисунок 2.9 – ТХ для двух термодатчиков для двух частот вращения (№2 и №9, соответственно)



в)

Рисунок 2.10 – ХТП для двух частот вращения шпинделя

На основе полученных экспериментальных тепловых характеристик были построены функциональные зависимости «температура – частота вращения» $T(n)$ и «температурные перемещения – частота вращения» $\delta(n)$. На рисунке 2.11а и 2.11б приведены ТХ для двух термодатчиков №2 и №9, соответственно для четырех моментов времени: кривые 1 – 60 мин; кривые 2 – 120 мин; кривые 3 – 180 мин; кривые 4 – 240 мин. На рисунке приведены ХТП для координаты Y .

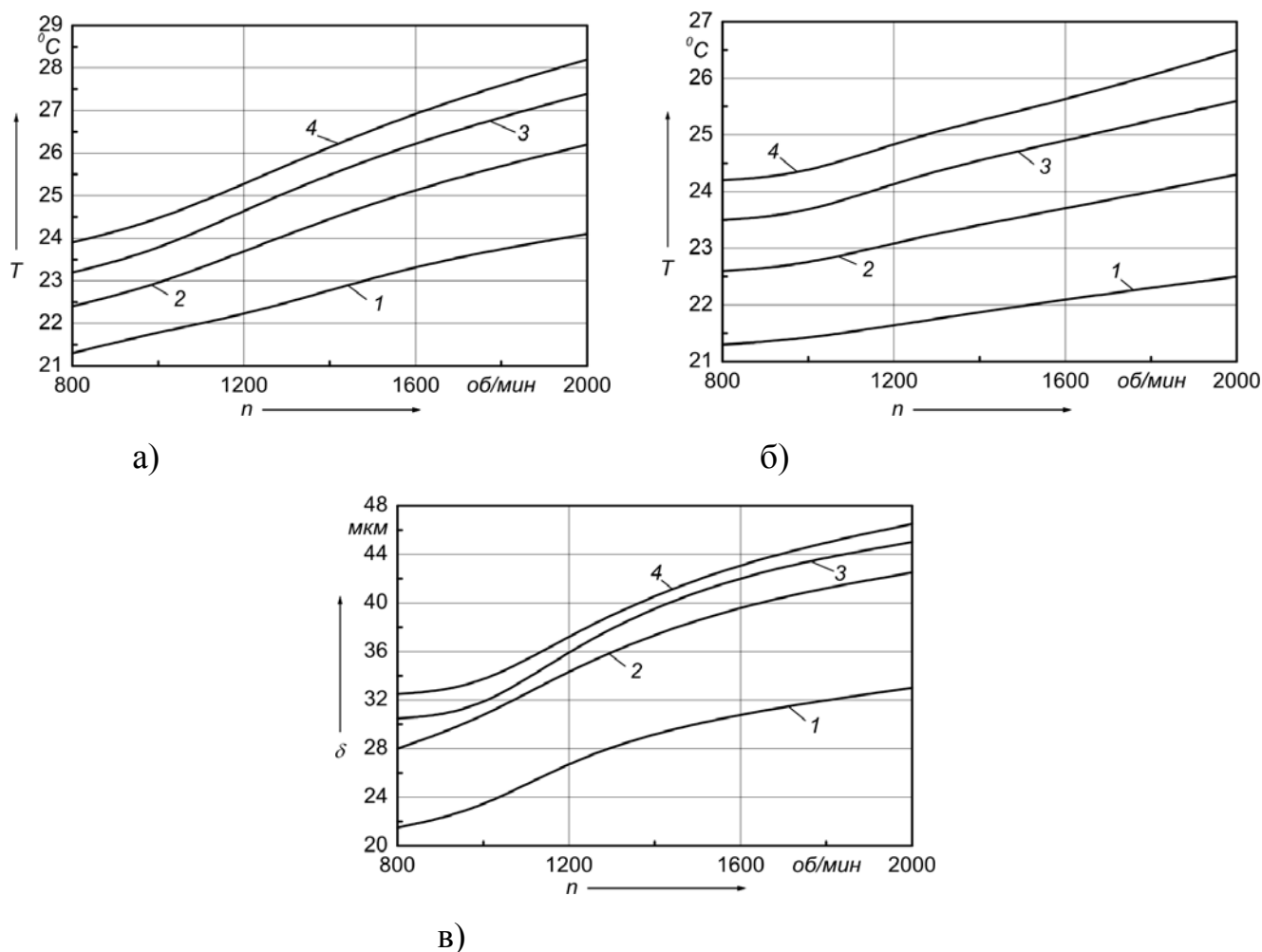


Рисунок 2.11 – Функциональные зависимости $T(n)$ и $\delta(n)$

Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования значений температур и перемещений для любых промежуточных значений частот вращений, для которых отсутствуют экспериментальные данные.

Таким образом, проведенные эксперименты показали:

– разброс экспериментальных значений температур не превысил $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– наименьший разброс экспериментальных значений температурных перемещений был зафиксирован для перемещений по оси шпинделя – координата Y и не превысил 10 мкм; в относительном представлении разброс перемещений по другим координатным осям значительный, ввиду небольших абсолютных значений перемещений и существенного влияния погрешности установки измерительных головок, используемых для измерения перемещений;

– температурные перемещения максимальны по координате Y – вдоль оси шпинделя; минимальные значения температурных перемещений фиксировались вдоль оси X ;

– функциональные зависимости $\delta(t)$ только по координате Y характеризуются выпуклостью вверх; температурные перемещения по координатам X и Z имеют существенно более сложный характер; при этом изменения температурных перемещений $\delta(t)$ по этим координатам не согласуются с изменяющимся уровнем теплового состояния несущей системы станка; например, по координате X функция $\delta(t)$ в начальный момент времени получает незначительный рост, а затем получает, хотя и незначительное, но продолжительное, снижение уровня перемещений; по координате Z на всех частотах вращения шпинделя фиксируется знакопеременное изменение функции $\delta(t)$;

– различие в уровне установившихся температурных перемещений более 10 мкм устойчиво наблюдается для частот вращения различающихся в пределах 800 об/мин, например, для 1250 об/мин и 2000 об/мин, а для частот вращения 800 и 1000 об/мин – это различие незначительное, ввиду небольших изменений в мощности тепловыделений в опорах шпинделя; это затрудняет построение однозначной функции $\delta(n)$ «перемещения – частота вращения»;

– уровень нагрева станка в зависимости от частот вращения характеризуется аналогичной закономерностью, т.е. ростом, причем более существенный рост фиксируется при больших частотах вращения.

2.3 Серия испытаний в условиях нагревание - остывание

Тепловые испытания проводились в условиях нагревания в течение различных интервалов времени, и затем остывание в течение определенного интервала времени. На рисунке 2.12 представлены экспериментальные ТХ; ХТП переднего конца гильзы шпиндельного узла станка представлены кривыми на рисунке 2.13, для которых введено буквенно-цифровое обозначение.

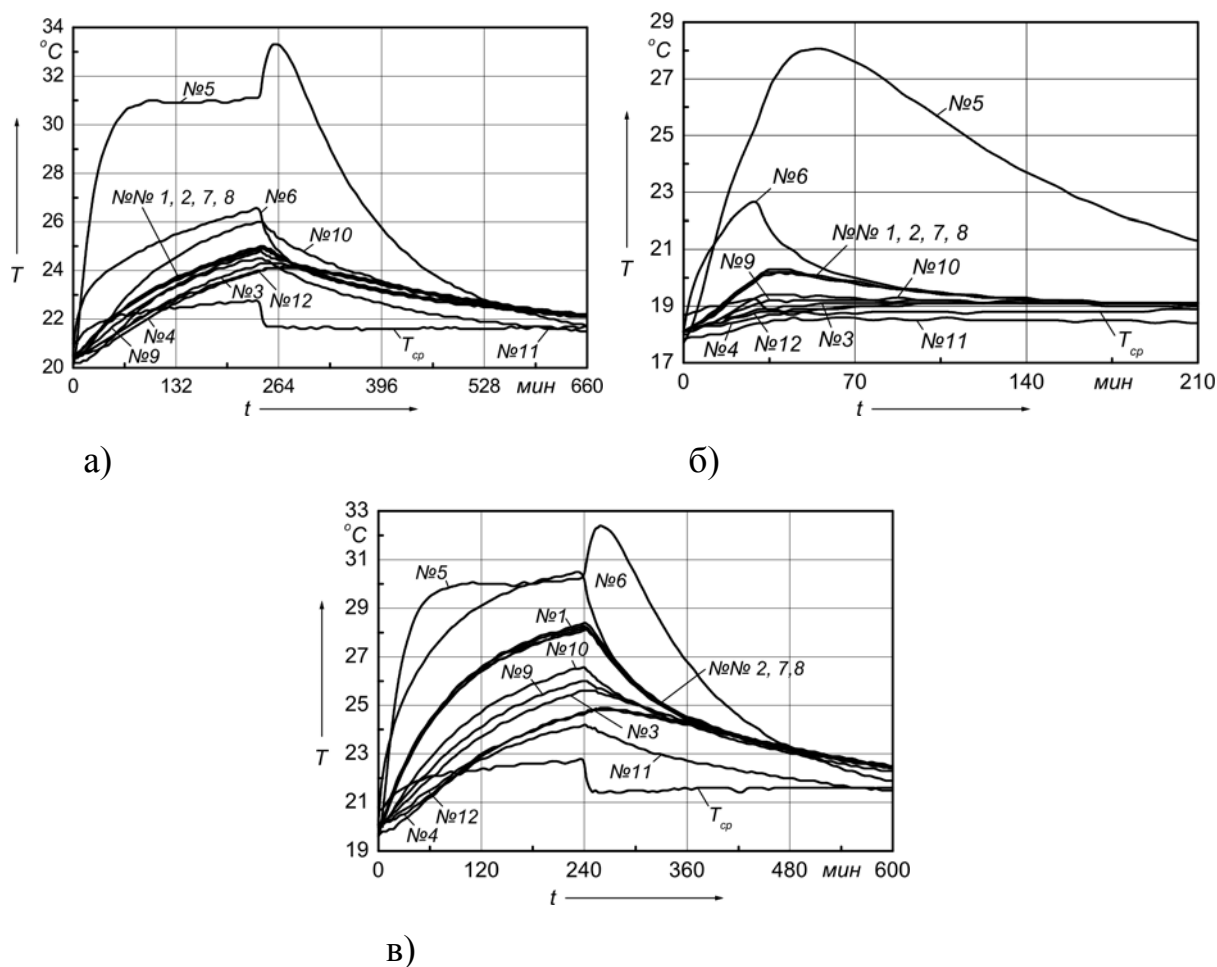


Рисунок 2.12 – ТХ станка на частотах 1000, 1600 и 2000 об/мин

Тепловые испытания были проведены по следующей программе:

а) нагревание в течение 240 минут на частоте 1000 об/мин и остывание в течение 420 минут (рисунок 2.12а);

б) нагревание в течение 30 минут на частоте 1600 об/мин и остывание в течение 180 минут (рисунок 2.12б);

в) нагревание в течение 240 минут на частоте 2000 об/мин и остывание в течение 360 минут (рисунок 2.12в).

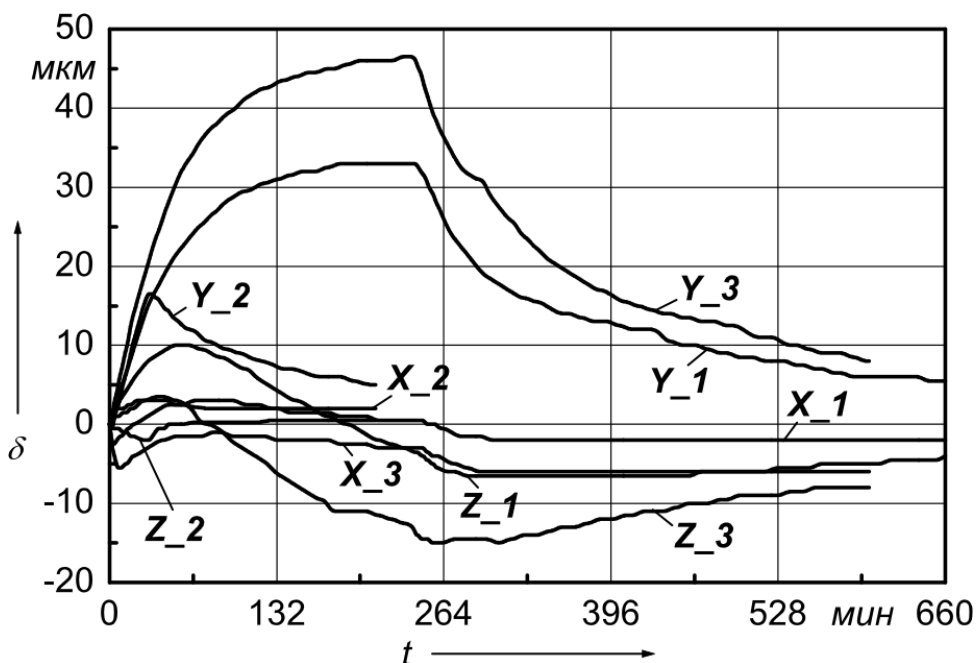


Рисунок 2.13 – ХТП шпинделя станка в условиях нагревание – остывание

Анализ результатов тепловых испытаний станка показал:

- изменение частоты вращения шпинделя не привело к изменению характера распределения температур, и температурная характеристика двигателя не претерпела изменения;

- максимальная величина избыточных температур после 240 минут тепловых испытаний станка составляло около $6,4^{\circ}\text{C}$ / $7,5^{\circ}\text{C}$ (в числителе для 2000 об/мин, в знаменателе для 1000 об/мин). При остывании через 360 минут это расхождение практически исчезло – $0,6^{\circ}\text{C}$ / $0,5^{\circ}\text{C}$;

- при сопоставлении избыточных температур получилась следующая картина (в числителе для 2000 об/мин, в знаменателе для 1000 об/мин), $^{\circ}\text{C}$: 1 – $8,3/4,5$; 2 – $8,1/4,4$; 3 – $5,5/3,8$; 4 – $4,3/3,5$; 5 – $10,7/11$; 6 – $10,1/6$; 7 – $8/4,4$; 8 – $8,2/4,5$; 9 – $5,9/4,3$; 10 – $6,6/5,6$; 11 – $4,5/4,3$; 12 – $4,5/3,5$. Откуда видно, что влияние изменения частоты

вращения шпинделя на ТХ наиболее ярко проявлялось в точках близких к основным источникам тепла;

- за время работы станка температура окружающей среды не изменилась более чем на 2°C , но и не оставалась неизменной;

- при выключении станка фиксировался рост температуры в отдельных точках станка, особенно это проявлялось на главном электродвигателе станка;

- темп охлаждения станка существенно ниже темпа нагревания – это отражают как ТХ, так и ХТП; например, скорость изменения температурных перемещений за первый час работы станка на частоте 2000 об/мин составила почти 0,5 мкм/мин, а при его остывании за первый час – не превысила 0,15 мкм/мин; соответственно, скорость изменения температуры для шестого датчика в первый час работы станка составила – 7°C/ч , а при остывании – около 4°C/ч ;

2.4 Серия испытаний в условиях переменных тепловых режимов

Реальная механообработка на металлорежущем станке реализуется в условиях изменяющихся во времени режимов его работы, обусловленных технологическим процессом изготовления конкретной детали. Устоявшегося и, тем более, стандартизованного термина, как, например, для электрических машин, для такого режима работы станка – нет. Для электрических машин по характеру изменения нагрузки режимы работы подразделяют на: продолжительный, кратковременный, повторно – кратковременный и перемежающийся. В работе для краткости изложения исследований режим работы станка с изменяющимися во времени частотами вращения шпинделя будем называть переменный тепловой режим. Этот термин оправдан, т.к. частота вращения шпинделя функционально связана с мощностью тепловыделения.

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 понима-

ется вариант, в котором реализуется сочетание частот вращения шпинделя без периодичности.

2.4.1 Серия хаотичных режимов работы

Серия хаотичных режимов состояла из двух вариантов работы станка:

- одна смена частот вращения, т.е. два участка частот вращения шпинделя;
- семь участков частот вращения.

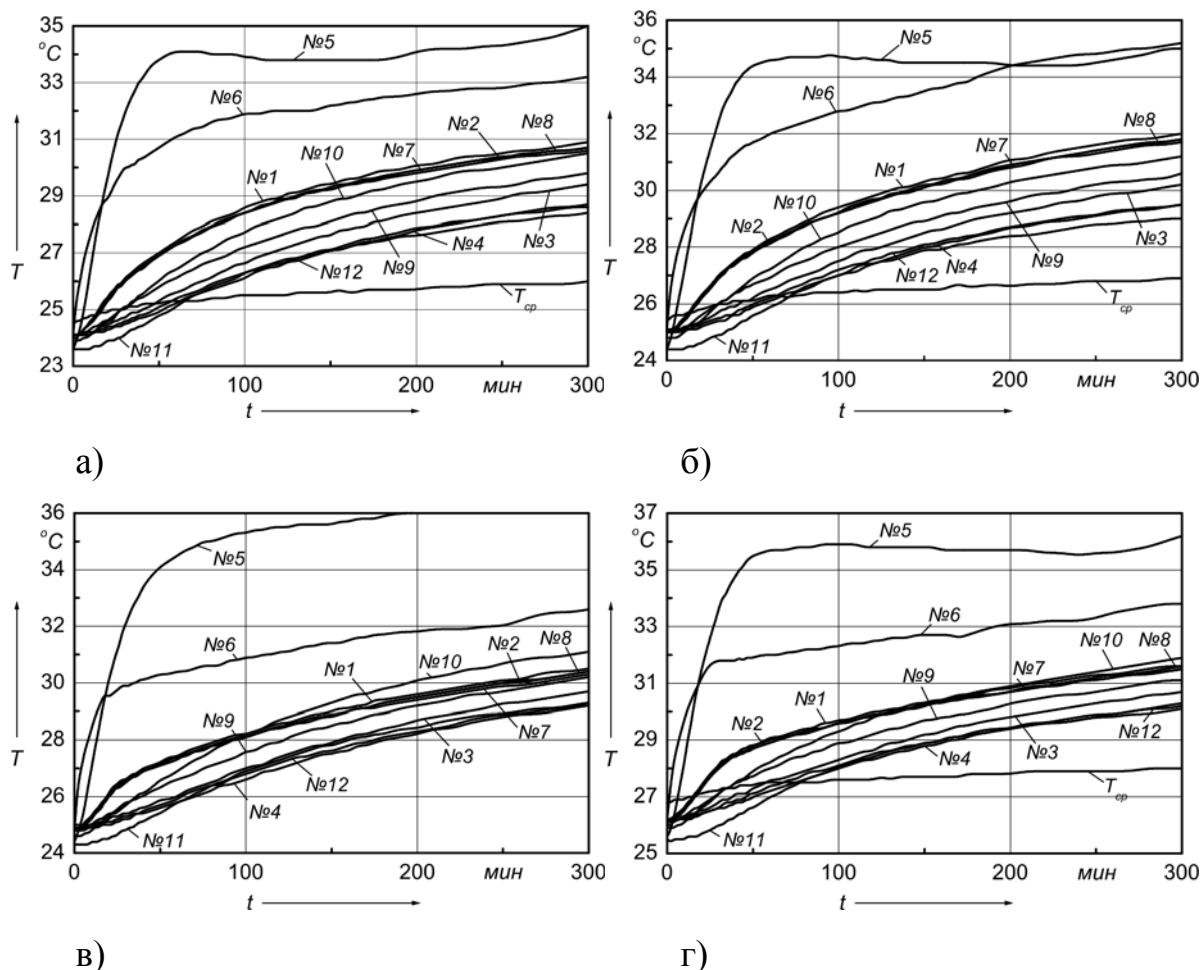
Были проведены две серии натурных испытаний станка. Длительность каждого испытания составляло 300 минут.

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 об/мин, в соответствие с циклограммами.

На рисунках 2.14 и 2.15 представлены экспериментальные тепловые характеристики станка для первой серии экспериментов.

Их анализ показывает, что величина избыточной температуры в точке №8 (расположенной вблизи передней опоры шпинделя) в первом варианте смен частот (2000/1600 об/мин, рисунок 2.14а) составила 6,6 °С, а во втором варианте смен частот на этих же частотах – 6,7 °С (рисунок 2.14б). Для смен частот вращения 2000/1250 об/мин (рисунок 2.14в и 2.14г) величина избыточной температуры составила 5,6 °С и 5,4 °С для первого и второго вариантов работы станка, соответственно. Изменение частоты вращения шпинделя в разных сериях не привело к существенному изменению ТХ электродвигателя (датчик №5).



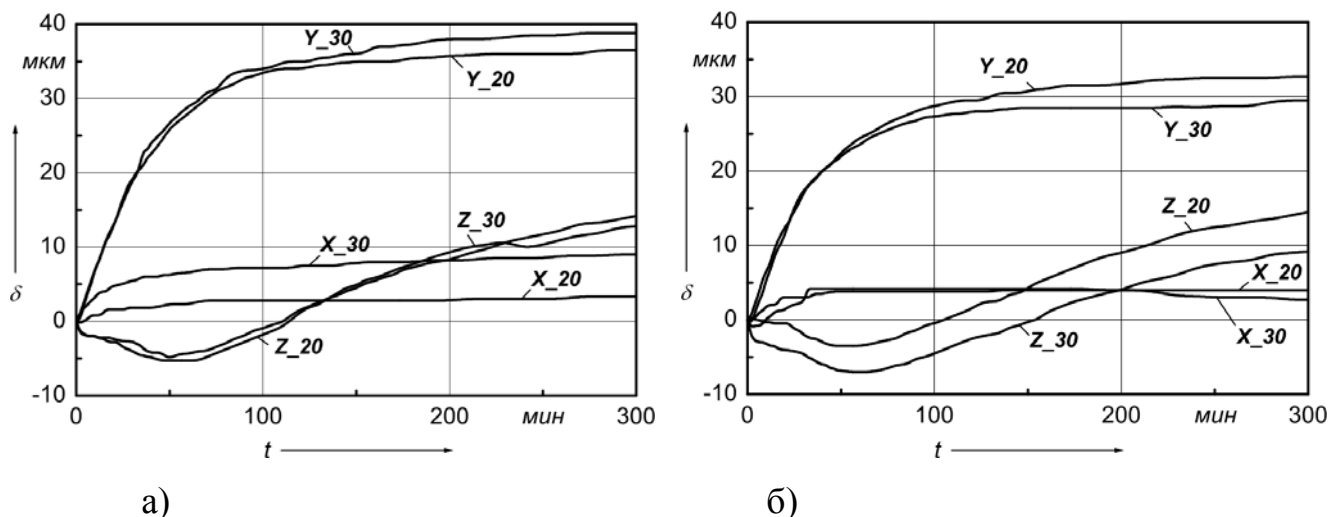
а) 20 минут на частоте 2000 об/мин и переход на частоту 1600 об/мин; б) 30 минут на частоте 2000 об/мин и переход на частоту 1600 об/мин; в) 20 минут на частоте 2000 об/мин и переход на частоту 1250 об/мин; г) 30 минут на частоте 2000 об/мин и переход на частоту 1250 об/мин

Рисунок 2.14 – ТХ станка в режиме работы на двух частотах вращения

Величина температурных перемещений по оси Y за пять часов работы в условиях первого варианта работы станка на частотах 2000/1600 об/мин составляла 36,5 мкм, а в условиях второго варианта на тех же частотах – 38,8 мкм (рисунок 2.15а). На частотах 2000/1250 об/мин в первом варианте величина температурных перемещений в конце эксперимента составляла 32,7 мкм, а во втором варианте – 29,5 мкм (рисунок 2.15б).

Таким образом, анализ результатов тепловых испытаний станка в режиме одной смены частот показал, что для одной координаты Y строго соблюдаются физические закономерности: большей частоте вращения шпинделя (а значит большие

энергетические потери в опорах шпинделя) соответствуют большие температурные перемещения. Для координат X и Z такие закономерности выражены, слабей, т.к. в экспериментальные данные характеризовались большим разбросом.



а) первая частота 2000 об/мин и переход на частоту 1600 об/мин; б) первая частота 2000 об/мин и переход на частоту 1250 об/мин

Рисунок 2.15 – ХТП в режиме работы на двух частотах вращения

Циклограммы других «хаотичных» режимов работы станка представлены на рисунке 2.16. Для первой группы циклограмм (рисунок 2.16а – 2.16г) варианты работы станка различались только частотой вращения на первом временном интервале (30 мин). Во втором случае представлены циклограммы, в которых организована перестановка повторяющихся режимов работы станка, т.е. длительность работы станка на конкретной частоте вращения во всех трех вариантах – неизменна (рисунок 2.16б, 2.16д и 2.16е).

На рисунке 2.17 представлены ТХ для семи циклограммам (нумерация циклограмм соответствует последовательности следования циклограмм на рисунке 2.16).

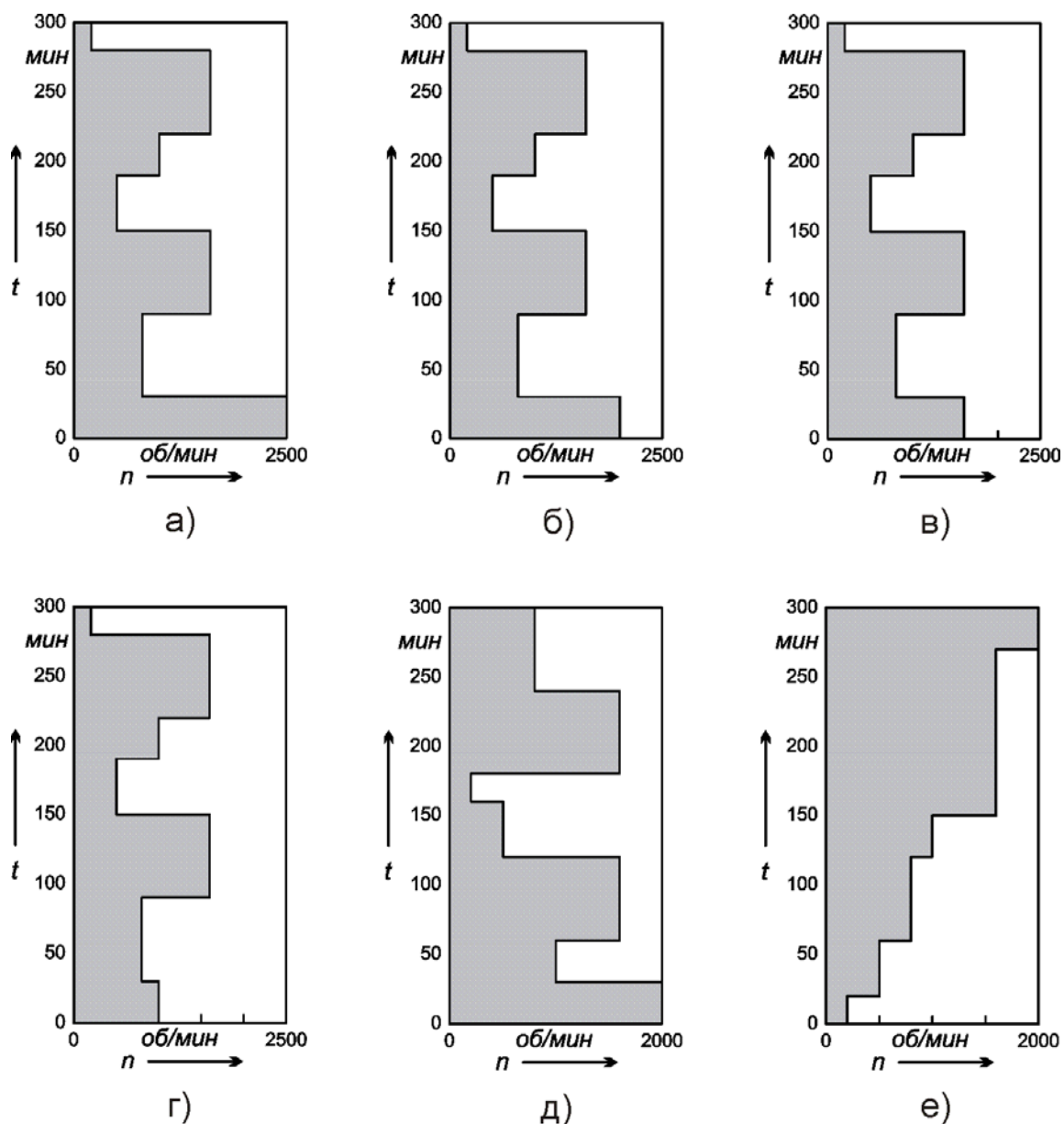


Рисунок 2.16 – Варианты циклограмм работы станка

Экспериментальные ТХ станка проведенной серии испытаний показали следующее:

- наиболее нагретым элементом станка является главный двигатель;
- экспериментальные ТХ в различных точках несущей системы станка в неодинаковой степени отражают циклограмму его работы:
 - ТХ электродвигателя слабо отражают изменения частоты вращения шпинделя;
 - ТХ шпиндельной гильзы в наибольшей степени отражают изменения частоты вращения шпинделя, ТХ в точках №1, 2, 7 и 8 (шпиндельная бабка),

расположенных вблизи передней опоры шпинделя, тоже отражают циклограмму работы станка;

– остальные ТХ мало, чем отличаются от характеристик станков, работающих в условиях непрерывной работы на фиксированной частоте вращения шпинделя.

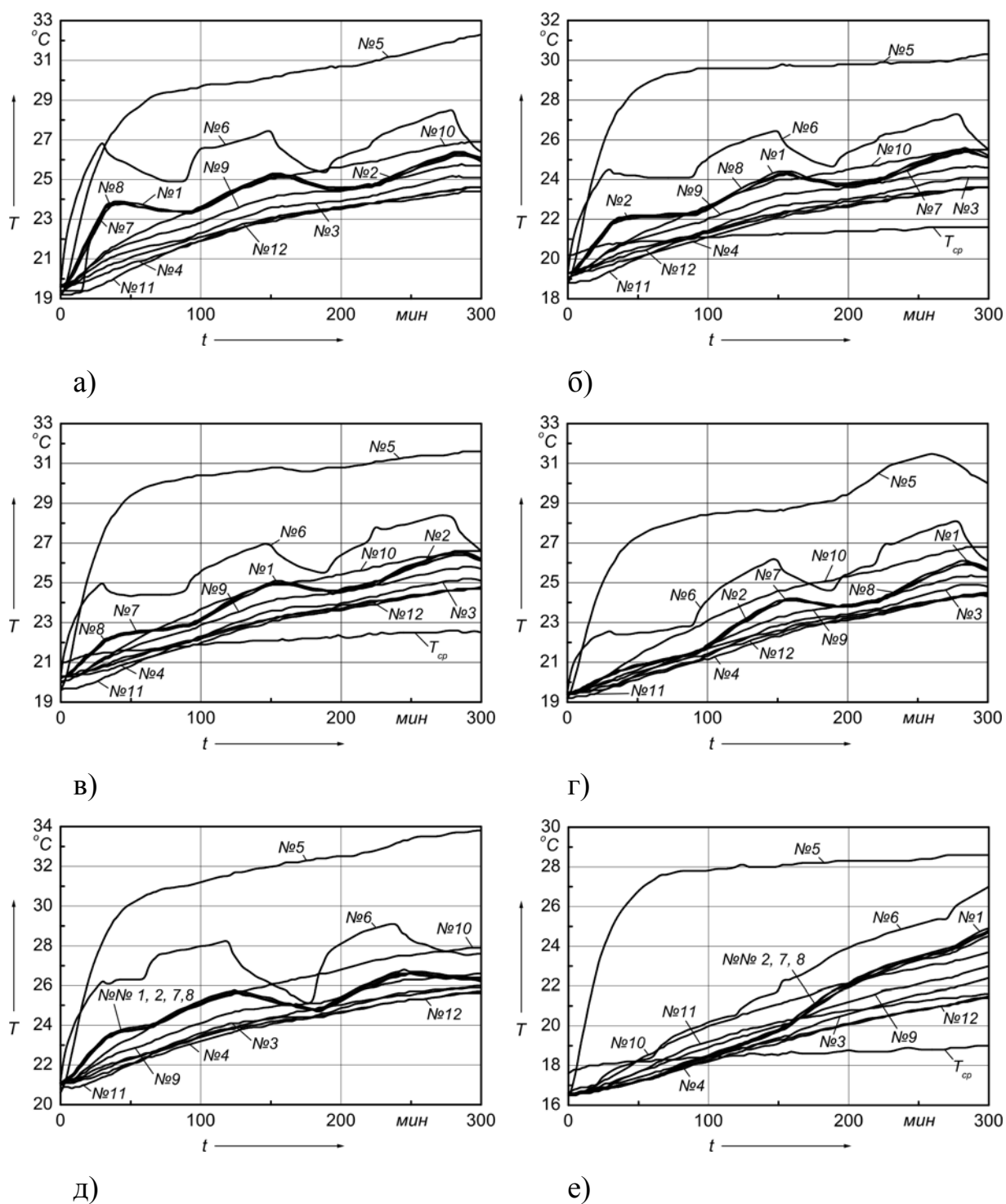


Рисунок 2.17 – ТХ станка для циклограмм №1 – 6

На рисунке 2.18а и 2.18б представлены экспериментальные ХТП вдоль осей шпинделя для циклограмм, изображенных на рисунках 2.16а – 2.16г. Для функций экспериментальных координатных перемещений введено буквено-цифровое обозначение: координата и номер циклограммы.

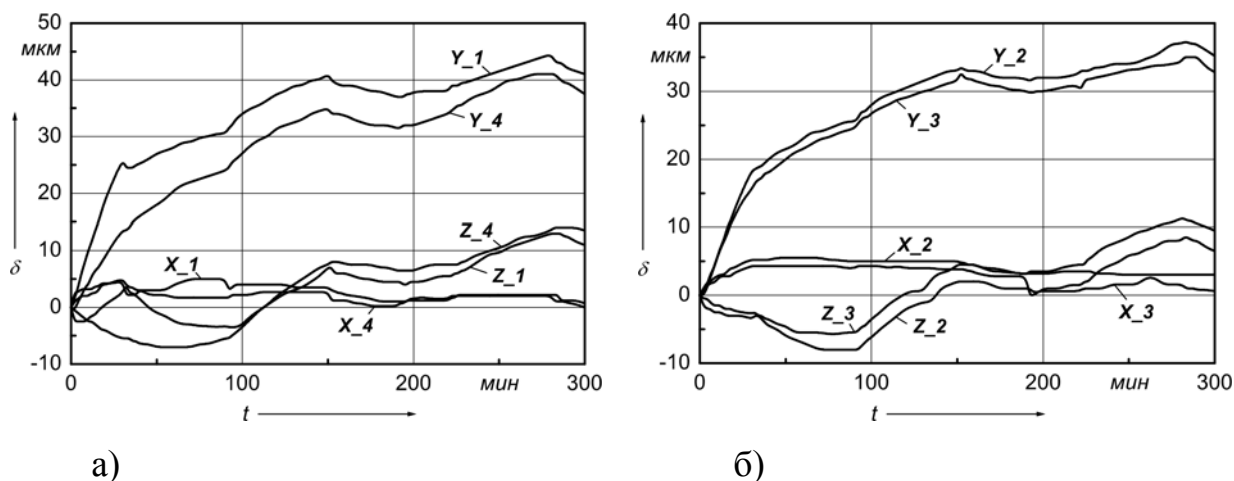


Рисунок 2.18 – Экспериментальные ХТП для первой группы циклограмм

На рисунке 2.19 представлены экспериментальные ХТП вдоль осей шпинделя для циклограмм, изображенных на рисунках 2.16б, 2.16д и 2.16е.

Экспериментальные ХТП показали следующее:

– для первой группы циклограмм (рисунок 2.16а – 2.16г):

– на первом участке работы станка характер изменения перемещений соответствовал рабочей частоте вращения шпинделя, т.е. большей частоте вращения шпинделя соответствовал больший уровень нагрева за одинаковый интервал времени и больший темп нагрева;

– на последующих участках, несмотря на идентичность циклограммы работы станка, изменения температурных характеристик не подчинялись однозначной закономерности – так, ввиду идентичности тепловыделений в шпиндельных опорах на последующих участках циклограммы, теоретически необъяснимо возрастание характеристики Y_4 (рисунок 2.18а) на третьем участке (интервал времени – [90,150] мин, частота вращения шпинделя – 1600 об/мин);

– для второй группы циклограмм (рисунок 2.16б, 2.16д и 2.16е) наблюдается

переменный характер характеристик, согласующийся с закономерностями изменения циклограммы работы станка.

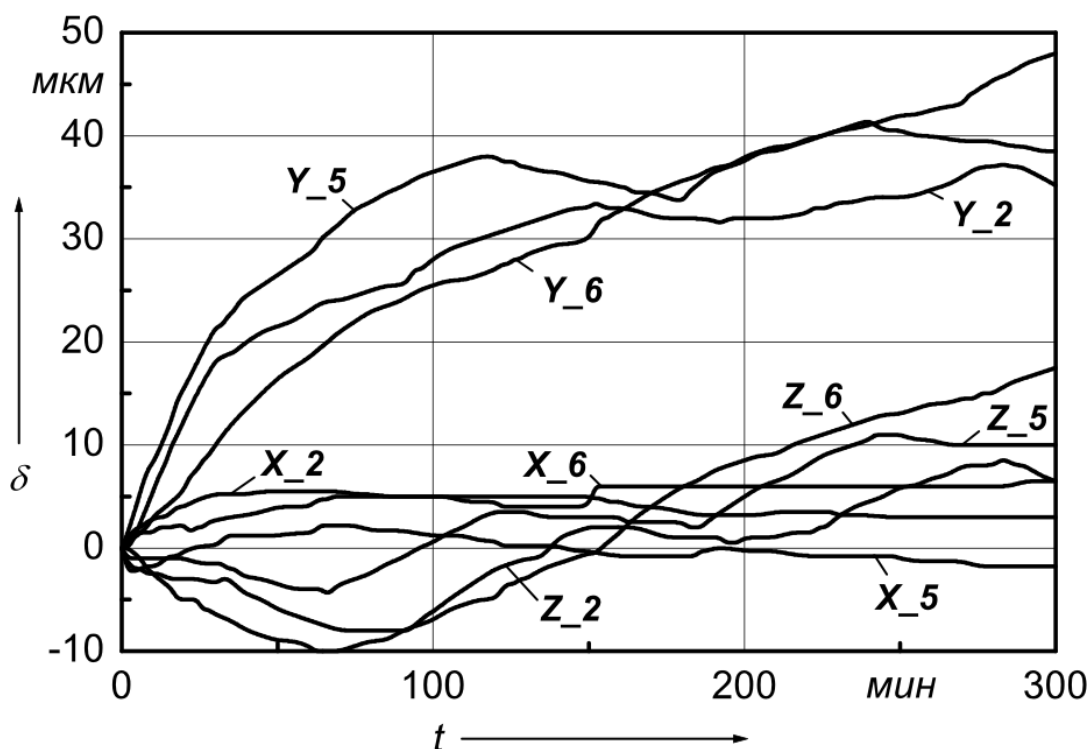
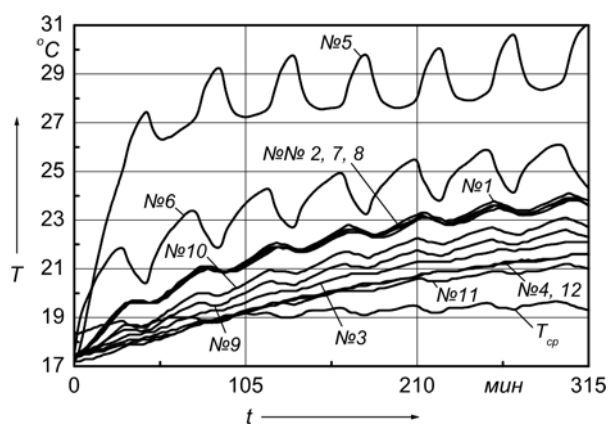


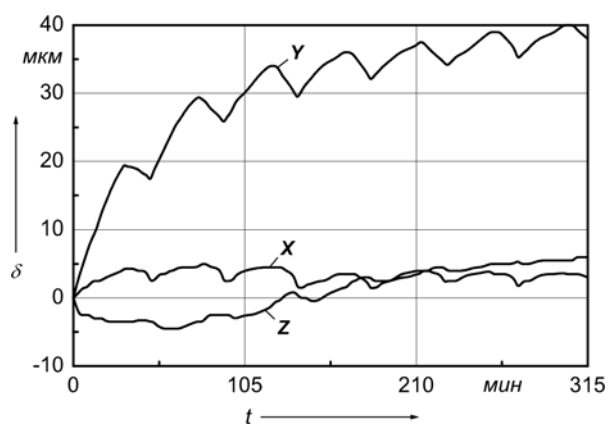
Рисунок 2.19 – Экспериментальные ХТП для второй группы циклограмм

2.4.2 Серия повторно-кратковременных режимов работы

Повторно – кратковременный режим представлял собой периодическое чередование работы на фиксированной частоте вращения шпинделя и отключение. При этом были проведены натурные испытания 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. На рисунках 2.20 – 2.23 приведены экспериментальные тепловые характеристики станка, работающего в условиях повторно – кратковременных режимов.

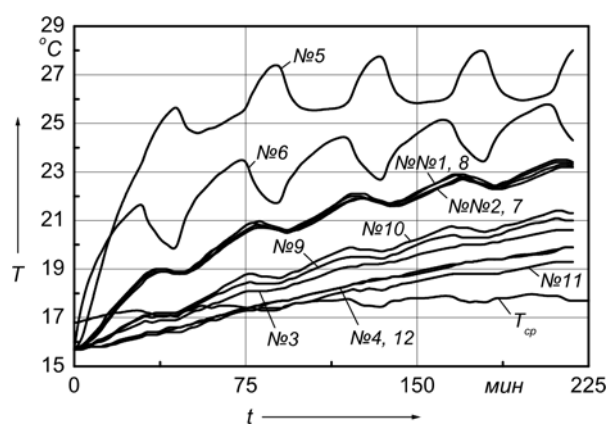


а)

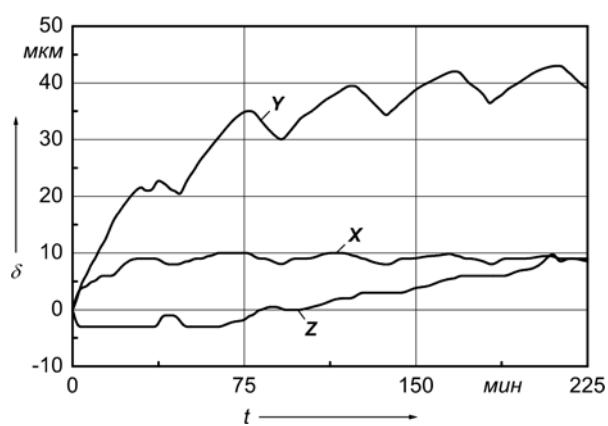


б)

Рисунок 2.20 – Экспериментальные ТХ и ХТП станка, 1600 об/мин,
режим 30 – 15

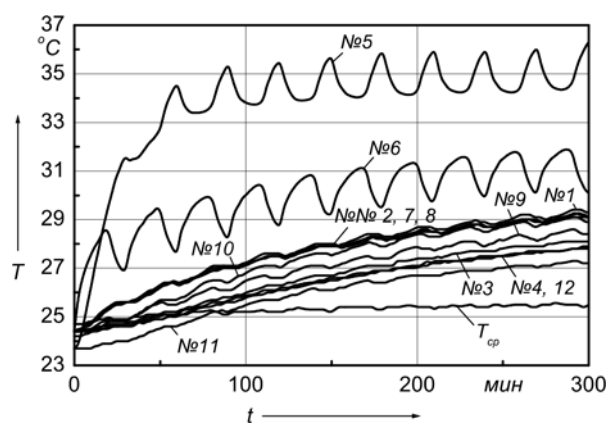


а)

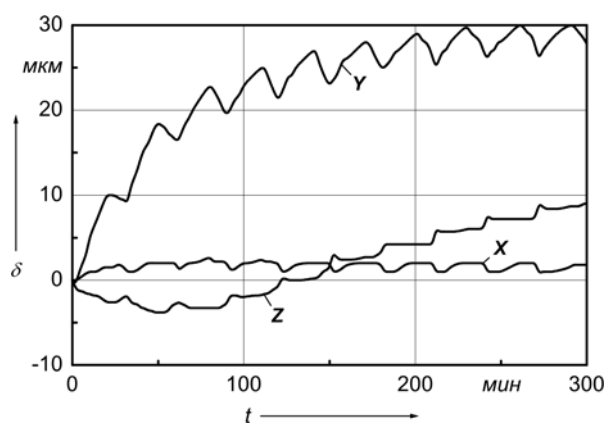


б)

Рисунок 2.21 – Экспериментальные ТХ и ХТП станка, 2000 об/мин,
режим 30 – 15



а)



б)

Рисунок 2.22 – Экспериментальные ТХ и ХТП станка, 1600 об/мин,
режим 20 – 10

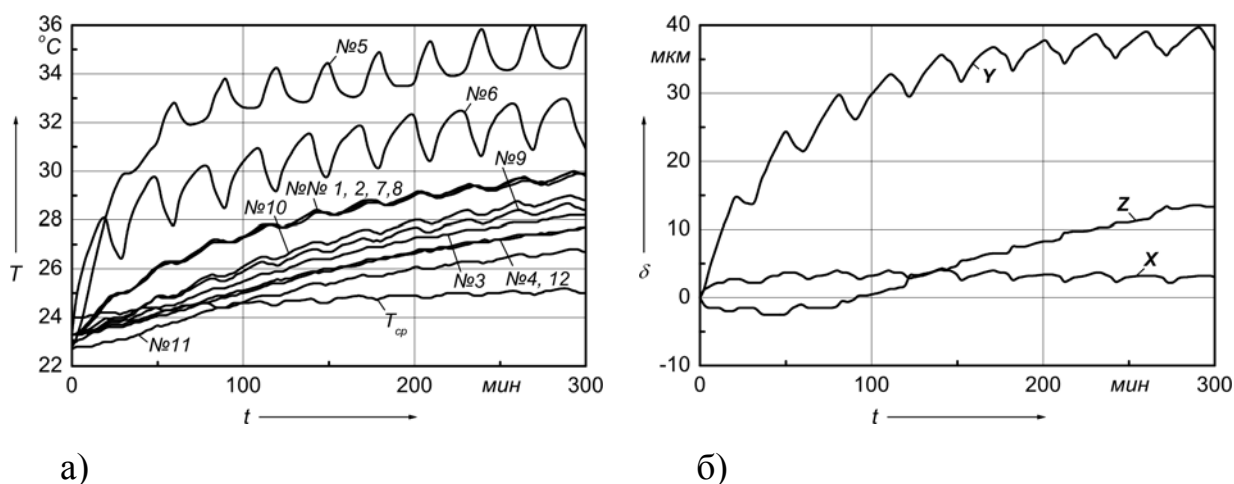


Рисунок 2.23– Экспериментальные ТХ и ХТП станка, 2000 об/мин,
режим 20 – 10

Анализ ТХ показал следующее.

1) Наблюдаются смещения во времени «пиков» и «впадин» ТХ для различных точек несущей системы станка (НСС); наиболее заметны смещения для датчиков №№ 5 и 6.

2) Температура на поверхности корпуса электродвигателя (датчик №5) в каждый момент выключения шпинделя резко начинала повышаться. В моменты повторных включений в течение нескольких минут – понижалась; спустя 7 - 8 минут – повышалась. Максимальные значения температуры в конце эксперимента оказались равными, что показало состояние температурной стабилизации электродвигателя.

3) Характер флуктуаций переднего конца (гильзы) шпиндельного узла представлен кривой 6. В каждый момент выключения шпинделя температура через 3 - 4 минуты начинала заметно снижаться, а в момент повторного включения шпинделя – увеличивалась.

4) Более гладкие характеристики формировались в точках несущей системы наиболее удаленных от шпиндельных подшипников.

5) Флуктуации температуры технической среды имели две ярко выраженные тенденции. Первая тенденция, связана с неотъемлемым повышением температуры шпиндельного узла. Вторая тенденция связана с изменением условий конвективного теплообмена в виде воздушных потоков, обуславливаемых кинематическим состоя-

нием шпинделя. Если для первых двух периодов включения и отключения станка изменения теплового состояния не имело ярко выраженный характер, то, начиная с третьего отключения станка, наблюдалась устойчивая картина: в период отключения станка температура падала, а в период его включения – увеличивалась. Это можно объяснить изменением соотношения температуры, окружающей шпиндель, и нагревом самого шпинделя. При вращении шпинделя – он отдавал в окружающую среду теплоту, при достаточном уровне его нагрева, т.е. шпиндель для технической среды выступал как источник тепла. При отключении станка, напротив, температура технической среды уменьшалась на $0,5^{\circ}\text{C}$ - $0,8^{\circ}\text{C}$.

б) Температурные перемещения только вдоль оси Y наиболее строго отражали характер изменения режимов работы станка.

Для оценки погрешности измерений перемещений в условиях натурных испытаний и выявления закономерностей изменения ХТП на рисунке 2.24 приведены ХТП вдоль оси шпинделя Y для двух вариантов повторно-кратковременного режима работы станка: тридцатиминутное включение станка и пятнадцатиминутное остывание (условно обозначим «30 – 15»); двадцатиминутное включение станка и десятиминутное остывание (условно обозначим «20 – 10»).

Характеристики приведены для двух частот вращения 1600 и 2000 об/мин. Для 1600 об/мин – кривые 1,3 и 5; для 2000 об/мин – кривые 2 и 4. Характеристики 3, 4 и 5 иллюстрируют режим «20–10», характеристики 1 и 2 – режим «30 – 15».

Анализ кривых показывает:

- строгое чередование пиков и впадин во всех вариантах работы станка;
- максимальные перемещения по оси шпинделя при тридцатиминутном интервале работы станка на частоте 2000 об/мин превысили не более 5 мкм перемещения на той же частоте в варианте двадцатиминутной работы станка; качественно аналогичный результат был зафиксирован и при работе станка на частоте 1600 об/мин – сопоставление кривых 1, 3, 5 (1600 об/мин) и 2, 4 (2000 об/мин), соответственно;
- уровень максимальных перемещений по оси шпинделя при работе на частоте 2000 об/мин оказывается примерно на 7,5 - 9 мкм больше, чем при работе на частоте

1600 об/мин при идентичных циклограммах работы станка – сопоставление кривых 1, 2 и, соответственно, 3, 4;

– кривые 3 и 5, несмотря на полную идентичность режимов работы станка, включая циклограмму работы и частоту вращения шпинделя, показали наличие расхождения характеристик в пределах 5 мкм – сопоставление кривых 3 и 5.

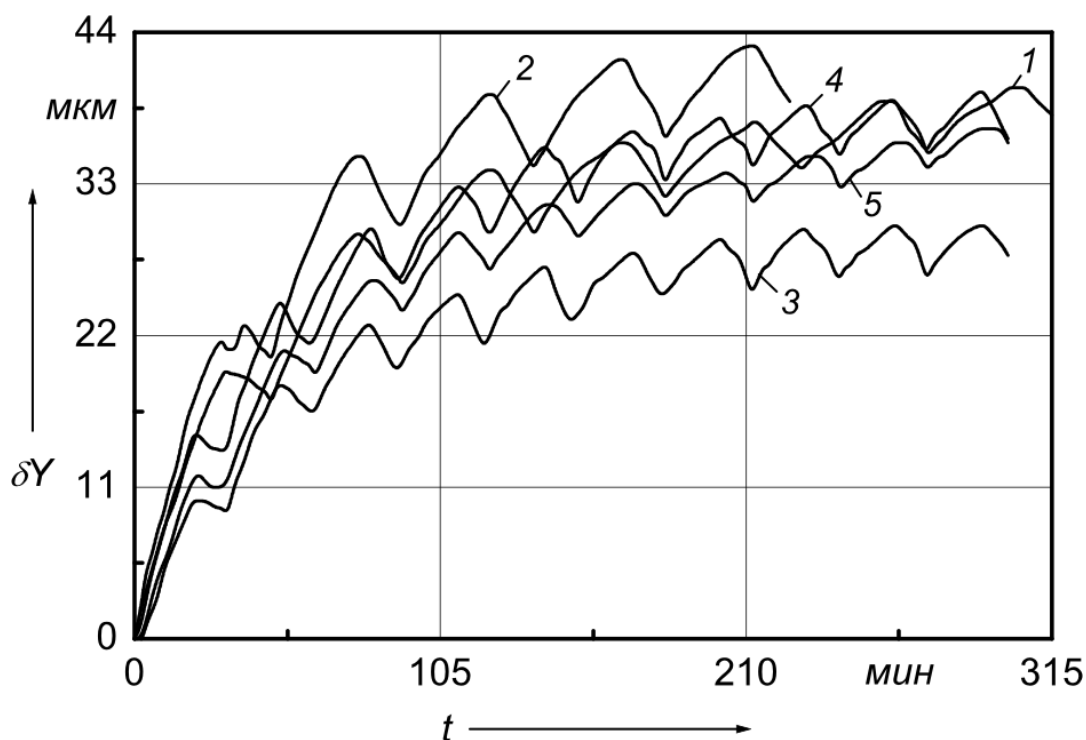


Рисунок 2.24 – Экспериментальные ХТП вдоль оси шпинделя станка

Это позволило установить следующие закономерности:

– шпиндельная бабка достаточно точно отрабатывает периоды включения и отключения станка;

– уровень достигаемых перемещений на фиксированной частоте вращения шпинделя при одинаковой длительности работы станка (общая длительность повторно – кратковременной работы за вычетом длительности простоя станка) пропорционален длительности одного интервала непрерывной его работы;

– уровень максимальных перемещений по оси шпинделя для идентичных циклограмм работы станка в условиях повторно – кратковременных режимов достигается при большей частоте вращения.

2.5 Экспериментальные зависимости температурных перемещений от температур в металлорежущих станках

Как было показано в первой главе, при создании различных систем компенсации температурных погрешностей одним из важнейших направлений является прогнозирование температурных перемещений по данным термодатчиков, установленных на элементах несущей системы станка. Очевидно, что правомерность такого подхода оправдана только в том случае, когда температурные перемещения элементов несущей системы оказываются инвариантными к истории формирования теплового состояния. Это означает, что избыточную температуру в анализируемой точке НСС можно получить в результате принципиально различающихся тепловых режимов работы станка (т.е. существует множество вариантов), но в случае инвариантности функции «перемещение – температура» $\delta(T)$ – для фиксированной температуры всегда должно получаться фиксированное перемещение или с незначительным допуском.

Для отыскания функциональных зависимостей $\delta(T)$ и исследования особенностей их проявления в зависимости от пространственного расположения термодатчиков и рассматриваемых координатных осей станка было разработано специальное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение, позволившее выполнить анализ экспериментальных тепловых характеристик несущих систем.

Для описания температурных характеристик НСС использовались два типа математических моделей — полином в виде степенного многочлена и сумма экспоненциальных функций, сформированных на основе экспериментального модального анализа [27, 62, 76, 84].

Аппроксимирующая функция в виде многочлена $\hat{T}(t)$ имеет вид:

$$\hat{T}(t) = \sum_{k=0}^p a_k t^k, \quad (2.1)$$

где p – целое число;

a_k — искомые многочлены;

t — время.

Аппроксимирующая функция в терминах экспериментального модального анализа $\hat{T}(t)$ имеет вид:

$$\hat{T}_{ij,m}(t_j) = \sum_{k=1,4,\dots,3m-2} x_{k,i} (1 - e^{-t_j / x_{k+1,i}}) + \sum_{k=1,4,\dots,3m-2} x_{k+2,i} e^{-t_j / x_{k+1,i}},$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, L \quad (2.2)$$

где $x_{k,i}, x_{k+1,i}, x_{k+2,i}$ — модальные параметры;

m — число температурных мод;

i — номер датчика температуры;

t_j — отдельный интервал времени, в который проводились измерения;

N — общее число термодатчиков;

L — число интервалов времени, составляющих рассматриваемый диапазон времени $t \in [t_1, t_L]$.

Для описания ХТП применялись выше описанные модели, с тем отличием, что при реализации экспериментального модального анализа использовались две математические модели: без запаздывания вида (2.2) и с запаздыванием, вида:

$$\hat{\delta}_n(t_j) = \sum_{k=1,5,\dots,4m-3} x_{k,n} (1 - e^{-(t_j - x_{k+3}) / x_{k+1,n}}) + \sum_{k=1,5,\dots,4m-3} x_{k+2,n} e^{-(t_j - x_{k+3}) / x_{k+1,n}}$$

$$n \rightarrow X, Y, Z \quad (2.3)$$

где x_{k+3} — искомое время запаздывания.

Для оценки качества функциональной связи координатных перемещений от измеренных температур $\hat{\delta}_n(T_i(t_j))$ использовался расчет коэффициентов корреляции $\rho_{T\delta,n,i}$ и взаимной корреляционной функции $r_{T\delta,n,i}$ [90]:

$$\rho_{T\delta,n,i} = \frac{\sigma_{T\delta,n,i}}{\sigma_{\delta,n} \cdot \sigma_{T,i}}, \quad n \rightarrow X, Y, Z; i = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

$$r_{T\delta,n,i} = E[\delta_n(t_1) \cdot T_i(t_2)] \quad (2.5)$$

где $\delta_n(t)$ — координатное перемещение НСС вдоль n – ой оси;

$T_i(t)$ — измеренная температура в i – ой точке НСС (или показания i –го термодатчика);

E — условное обозначение математического ожидания;

$\sigma_{T\delta,n}$ — ковариация двух случайных функций $\delta_n(t)$ и $T_i(t)$;

$\sigma_{\delta,n}$ и $\sigma_{T,n}$ — величины стандартных отклонений для измеренных значений температурных перемещений и температур, соответственно;

t_1, t_2 — различные моменты времени.

Для каждого из рассмотренных в работе режимов работы оборудования устанавливались функции $\delta_n(T_i)$ (по экспериментальным данным) и $\hat{\delta}_n(T_i(t_j))$, коэффициенты корреляции $\rho_{T\delta,n,i}$ и взаимные корреляционные функции $r_{T\delta,n,i}$ для каждого координатного перемещения и каждой точки НСС. С использованием разработанного программного обеспечения в среде Matlab максимальный коэффициент корреляции $\rho_{\max,T\delta,n,i}$ температуры в i –ой точке НСС для каждого n – го координатного перемещения определялся в автоматическом режиме. Взаимные корреляционные функции позволяли оценить корреляцию исследуемых функций $\delta_n(t)$ и $T_i(t)$ независимо от имеющегося запаздывания. Знание $\rho_{\max,T\delta,n,i}$ позволяет гарантировать правильный выбор термодатчика НСС, используемого для косвенного измерения

температурных перемещений элементов НСС, при отсутствии возможности их прямого измерения для станка, работающего под нагрузкой. В таблице 2.1 приведены результаты расчетов коэффициентов корреляции $\rho_{\max, T\delta, n, i}$.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов коэффициентов корреляции

Частота вращения ШУ, об/мин	По оси X		По оси Y		По оси Z	
	Номер дат-чика ¹	$\rho_{T\delta, n, i}^2$	Номер дат-чика	$\rho_{T\delta, n, i}$	Номер дат-чика	$\rho_{T\delta, n, i}$
1600	4/6	0,171/0,175	4/6	0,902/0,991	6/4	0,86/0,98
2000	6/4	-0,16/-0,52	4/6	0,909/0,996	6/4	0,83/0,98
п к 1600 ³	6/4	-0,21/-0,73	4/2	0,78/0,91	6/4	0,77/0,93
п к 2500 ⁴	6/4	0,37/-0,62	6/2	0,85/0,96	6/4	0,62/0,85
Примечание: ¹ — В числителе (знаменателе) номер термодатчика, для которого зафиксировано минимальное (максимальное) значение коэффициента корреляции ² — В числителе (знаменателе) минимальное (максимальное) значение коэффициента корреляции, установленное на данном режиме работы станка ³ — условное обозначение для повторно – кратковременного режима работы станка, в первом интервале времени которого частота вращения шпинделя составляла 1600 об/мин ⁴ — условное обозначение для повторно – кратковременного режима работы станка, в первом интервале времени которого частота вращения шпинделя составляла 2500 об/мин						

Анализ коэффициентов корреляции температурных перемещений и температур $\rho_{\max, T\delta, n, i}$ показал следующее:

- наибольшие значения коэффициентов корреляции $\rho_{T\delta, n, i}$ на всех режимах работы станка, включая повторно – кратковременные, фиксировались для перемещений по оси Y (ось шпинделя) и незначительно меньшие по Z;
- при непрерывной работе станка максимальные значения коэффициентов корреляции $\rho_{T\delta, n, i}$ для перемещений:
 - по оси Y фиксировались для одного термодатчика 6, установленного на гильзе шпинделя — температурная характеристика в этой точке имела наименьшую тепловую постоянную времени;

– по оси Z фиксировались для термодатчика 4, установленного на шпиндельной головке — температурная характеристика $T_4(t)$ в этой точке характеризовалась меньшей интенсивностью изменений, чем точка 6.

Используя экспериментальные данные, полученные на станке 400V (производство ОАО Стерлитамак – М.Т.Е., Россия), общими выявленными закономерностями из анализа коэффициентов корреляции $\rho_{T\delta,n,i}$ для различных НСС являются:

– для коэффициентов корреляции $\rho_{T\delta,n,i}$ фиксированного координатного перемещения (вдоль выделенной координатной оси) всегда существует некоторый диапазон значений, т.е. всегда имеется, по крайней мере, одна точка НСС, в которой значение $\rho_{T\delta,n,i}$ достигает максимального значения;

– в одной и той же точке НСС при различных режимах работы станка не может фиксироваться максимальный коэффициент корреляции $\rho_{\max,T\delta,n,i}$; однако, при незначительных отличиях в частотах вращения шпинделя, может проявляться максимум $\rho_{\max,T\delta,n,i}$ в одной и той же точке (это характерно для универсальных станков с малым диапазоном регулирования в области высоких частот вращения шпинделя).

Результаты проведенных исследований позволили использовать экспериментальные данные только для датчика 4. Для его показаний были проведены дополнительные построения функций $\delta(T)$ по экспериментальным данным для пяти различных вариантов работы станка. На рисунках 2.25 и 2.26 приведены соответствующие ТХ для точки НСС и ХТП по одной оси.

На рисунках 2.25 и 2.26 для кривых введены следующие обозначения: 1 – непрерывный режим работы на частоте 1600 об/мин; 2, 4 и 3 – переменные тепловые режимы работы для циклограмм 2.16е, 2.16б и 2.16д, соответственно; 5 – повторно – кратковременный режим работы станка «20–10» на частоте 1600 об/мин. На рисунке 2.27 для рассмотренных вариантов работы станка приведены экспериментальные характеристики $\delta(T)$.

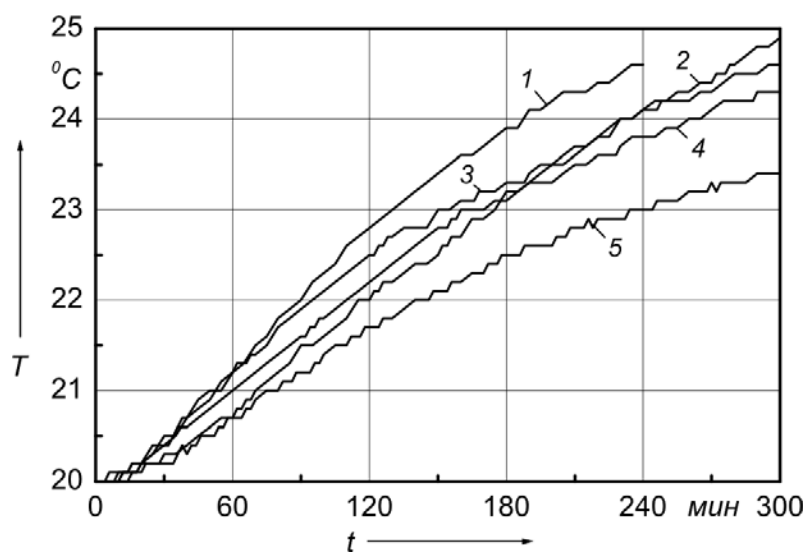


Рисунок 2.25 – ТХ для точки 4 НСС в пяти вариантах его работы

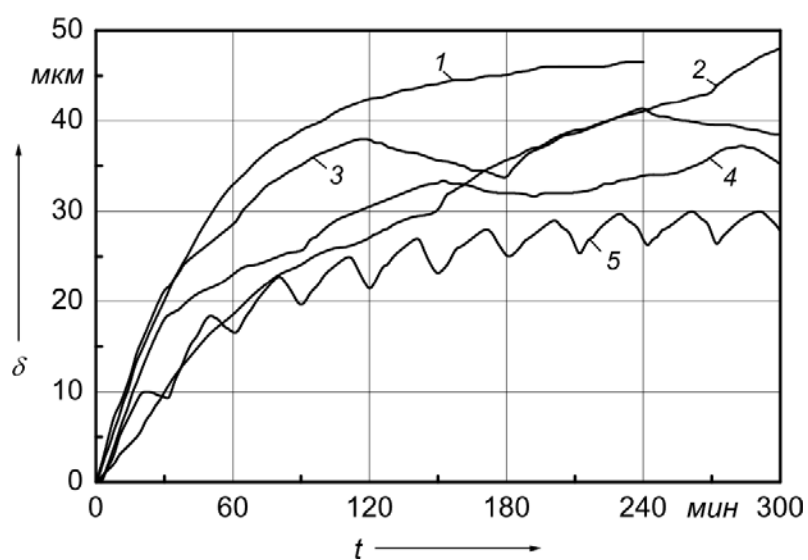


Рисунок 2.26 – ХТП по оси Y для пяти вариантов работы станка

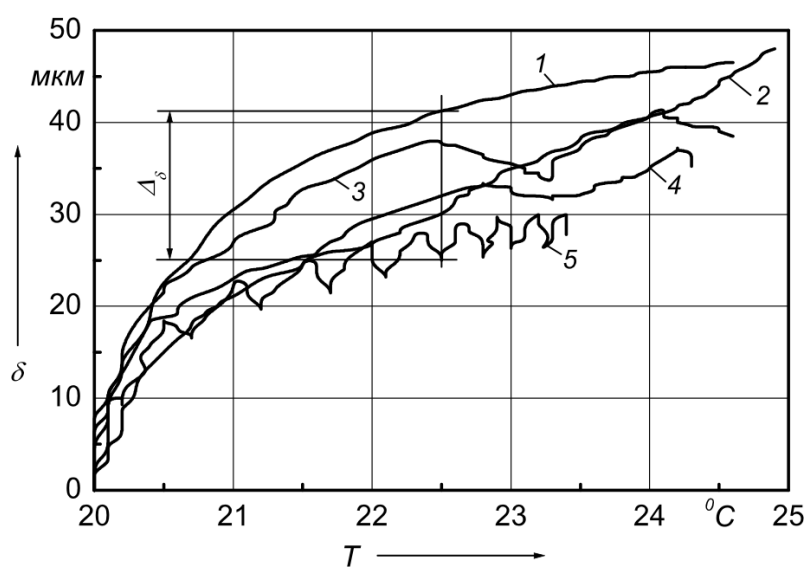


Рисунок 2.27 – Экспериментальные характеристики $\delta(T)$

Анализ характеристик $\delta(T)$ показывает, что для различных режимов работы станка может фиксироваться одно и то же значение температуры; однако при этом фиксируются различные температурные перемещения. В представленном варианте диапазон перемещений Δ_δ составляет более 50 % от минимального значения перемещения (в представленном варианте 25 мкм) при фиксированной температуре. Это означает, что только по показаниям термодатчика, без знания циклограммы работы станка, невозможно реализовать адекватный прогноз температурных перемещений.

3 Моделирование термодетформационного состояния станков

3.1 Математическое описание

Одной из задач вычислительных экспериментов является подтверждение выявленных из натурных испытаний закономерностей. Важнейшим преимуществом таких экспериментов является исключение случайных и систематических погрешностей, как средств измерений, так и условий проведения испытаний. В этом случае проявляются погрешности вычислений, но они оказывают влияние только на абсолютные значения моделируемых величин, а для вычислительных экспериментов все-таки наибольшее значение имеют качественные оценки.

В качестве одного из средства для проведения вычислительных экспериментов может выступать универсальная система инженерного анализа, математической основой которой является метод конечных элементов. Данные системы, получившие в последнее время широкое распространение на рынке программного обеспечения, позволяют на единой основе решать довольно обширный круг физических задач, к числу которых относят и задачу определения термодетформационного состояния станка.

Компьютерное моделирование осуществлялось с использованием САЕ-системы Ansys. Система позволяет решать связанную и несвязанную задачи термоупругости. Связанная задача термоупругости решается при наличии взаимосвязи тепловых деформаций и температурного поля. При односторонней связи решается несвязанная задача термоупругости [21, 25, 165].

В общем случае при решении связанной задачи термоупругости используется система вида в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{T} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [0] \\ [C^{TU}] & [R] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{T} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^{UT}] \\ [0] & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix}, \quad (3.1)$$

где $[M]$ – матрица масс, $[M] = \int_V \rho [N]^T [N] dV$;

$[H] = \int_V \lambda [B_T]^T [B_T] dV + \int_S \alpha [N]^T [N] dS$ – матрица теплопроводности;

$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$ – матрица жесткости;

$[D]$ – матрица упругости;

$[B]^T, [B]$ – дифференциальная матрица связи деформаций и перемещений (здесь символ «Т» означает транспонирование);

$[B_T]^T, [B_T]$ дифференциальная матрица функций формы для тепловой задачи;

λ – коэффициент теплопроводности материала;

$[R] = \int_V c \rho [N]^T [N] dV$ – матрица теплоемкости;

$[K^{UT}] = - \int_V [B]^T \{\beta\} (\nabla \{N\}^T) dV$ – термоупругая матрица жесткости;

$[N]$ – функция формы;

$\{U\}$ – вектор перемещений;

$\{T\}$ – вектор температур;

$[C^{TU}] = -T_o [K^{UT}]^T$ – матрица термоупругого демпфирования;

T_o – температура окружающей среды;

$\{\beta\} = [D] \{\alpha\}$ – вектор термоупругих коэффициентов;

$\{\alpha\}$ – вектор температурных коэффициентов линейного расширения материала;

$\{F\}$ – вектор узловых сил в задаче теории упругости;

$\{Q\}$ – вектор узловых сил в задаче теплопроводности.

Кроме матрицы демпфирования $[C]$ все матрицы и векторы из выражения (3.1) принципиально не зависят от особенностей используемого программного средства. Так как для вычислительных экспериментов в качестве основного программ-

ного средства использовалась CAE- система Ansys, то ниже представлена структура матрицы теплоемкости, принятой в этой системе в виде:

$$[C] = a[M] + (b + b_c)[K] + \sum_{j=1}^{N_m} \left[(b_j^m + \frac{2}{\Omega} b_j^\xi) [K_j] \right] + \sum_{k=1}^{N_e} [C_k] + [C_\xi], \quad (3.2)$$

где $a, b, b_c, b_j^m, b_j^\xi$ – эмпирические коэффициенты;

Ω – круговая частота колебаний;

N_m, N_e – количество моделей материала и количество конечных элементов, введенных в расчетную модель НСС для моделирования ее демпфирующих свойств;

$[C_k]$ – элемент матрицы демпфирования, определяемый для каждого типа конечного элемента индивидуально;

$[C_\xi]$ – компонент матрицы демпфирования, определяемый из зависимости:

$\{\Phi_j\}^T [C_\xi] \{\Phi_j\} = 2\xi_j^d w_j$; ξ_j^d – коэффициент демпфирования j -ой формы колебаний, определяемый как $\xi_j^d = \xi + \xi_j^m$; ξ – постоянная составляющая коэффициента демпфирования;

ξ_j^m – модальный коэффициент демпфирования j -ой формы колебаний.

При решении несвязанной задачи термоупругости система (3.1) становится несвязанной относительно векторов перемещений $\{U\}$ и температур $\{T\}$, т.к. в этом случае матрицы $[C^{TU}]$, $[K^{UT}]$ становятся нулевыми. Это позволяет найти решение системы (3.1) последовательным решением задач теплопроводности и механики твердого тела. В силу того, что тепловые процессы в станках относят к процессам средней скорости, вторая решаемая задача сводится к задаче в статической постановке.

Задача теплопроводности имеет вид:

$$[R] \overset{\circ}{\{T\}} + [H] \{T\} = \{Q\}, \quad (3.3)$$

Задача механики несущей системы станка в статической постановке имеет вид:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (3.4)$$

Для решения связанной задачи термоупругости строится единая расчетная модель. В системе Ansys для решения данной задачи предусмотрены четыре типа конечных элементов: Solid5, Solid98, Solid226 и Solid227 [160, 164, 169]. Геометрия, расположения узлов и системы координат для объемного элемента Solid226 приведены на рисунке 3.1.

Функции формы для элемента Solid226 с опциями, использованными при формировании модели, имеют следующий вид:

- для невырожденной (гексаэдрической) формы элемента:

$$u_x = \frac{1}{8} \left(\begin{aligned} &u_{x_I} (1-s)(1-t)(1-r)(-s-t-r-2) + u_{x_J} (1+s)(1-t)(1-r)(s-t-r-2) + \\ &u_{x_K} (1+s)(1+t)(1-r)(s+t-r-2) + u_{x_L} (1-s)(1+t)(1-r)(-s+t-r-2) + \\ &u_{x_M} (1-s)(1-t)(1+r)(-s-t+r-2) + u_{x_N} (1+s)(1-t)(1+r)(s-t+r-2) + \\ &u_{x_{OI}} (1+s)(1+t)(1+r)(s+t+r-2) + u_{x_P} (1-s)(1+t)(1+r)(-s+t+r-2) \end{aligned} \right) + \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{4} \left(\begin{aligned} &u_{x_Q} (1-s^2)(1-t)(1-r) + u_{x_R} (1+s)(1-t^2)(1-r) + u_{x_S} (1-s^2)(1+t)(1-r) + \\ &u_{x_T} (1-s)(1-t^2)(1-r) + u_{x_U} (1-s^2)(1-t)(1+r) + u_{x_V} (1+s)(1-t^2)(1+r) + \\ &u_{x_W} (1-s^2)(1+t)(1+r) + u_{x_X} (1-s)(1-t^2)(1+r) + u_{x_Y} (1-s)(1-t)(1-r^2) + \\ &u_{x_Z} (1+s)(1-t)(1-r^2) + u_{x_A} (1+s)(1+t)(1-r^2) + u_{x_B} (1-s)(1+t)(1-r^2) \end{aligned} \right)$$

где $u_{x_I} \dots u_{x_B}$ – смещение соответствующего индексу узла элемента в направлении оси X;

s, t, r – однородные координаты произвольной точки элемента.

Для двух остальных координатных направлений функции формы не приводятся, так как имеют аналогичную структуру записи.

При решении несвязанной задачи термоупругости необходимо строить две независимые расчетные модели с идентичным сеточным разбиением. При построении

тепловой расчетной модели предусмотрены конечные элементы Solid70, Solid 87 и Solid 90, а при определении температурных перемещений – Solid45, Solid65, Solid92, Solid95 и Solid185. Геометрия, расположения узлов и системы координат для объемного элемента Solid70 приведены на рисунке 3.2. Отличие геометрии и расположения узлов элемента Solid45 от элемента Solid70 заключается в отсутствие вырожденной формы в виде пирамиды.

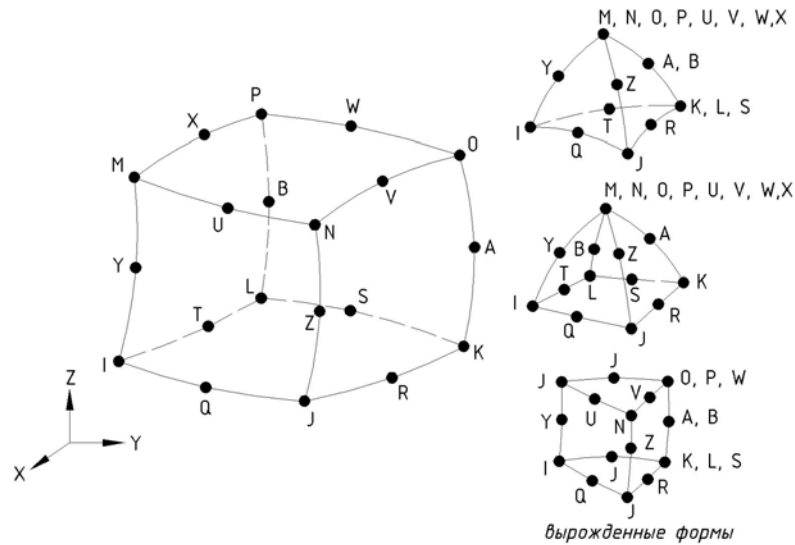


Рисунок 3.1 – Объемный элемент Solid226

Функции формы для элементов Solid45 и Solid70 с опциями, использованными при формировании модели, имеют следующий вид:

- для невырожденной (гексаэдрической) формы элемента:

$$U_X = \frac{1}{8} \cdot \begin{pmatrix} U_{X_i} \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) + U_{X_j} \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1-r) + \\ U_{X_k} \cdot (1+s) \cdot (1+t) \cdot (1-r) + U_{X_l} \cdot (1-s) \cdot (1+t) \cdot (1-r) + \\ U_{X_m} \cdot (1-s) \cdot (1-t) \cdot (1+r) + U_{X_n} \cdot (1+s) \cdot (1-t) \cdot (1+r) + \\ U_{X_o} \cdot (1+s) \cdot (1+t) \cdot (1+r) + U_{X_p} \cdot (1-s) \cdot (1+t) \cdot (1+r) \end{pmatrix}, \quad (3.6)$$

- для призматической формы элемента:

$$U_X = \frac{1}{2} \cdot U_{X_i} \cdot L_1 \cdot (1-r) + U_{X_j} \cdot L_2 \cdot (1-r) + U_{X_k} \cdot L_3 \cdot (1-r) + U_{X_m} \cdot L_1 \cdot (1+r) + U_{X_n} \cdot L_2 \cdot (1+r) + U_{X_o} \cdot L_3 \cdot (1+r), \quad (3.7)$$

- для тетраэдрической формы элемента:

$$U_X = U_{X_i} \cdot L_1 + U_{X_j} \cdot L_2 + U_{X_k} \cdot L_3 + U_{X_m} \cdot L_4, \quad (3.8)$$

где $u_{x_i} \dots_p$ – смещение соответствующего индексу узла элемента в направлении оси X;

L_1, L_2, L_3, L_4 – однородные координаты.

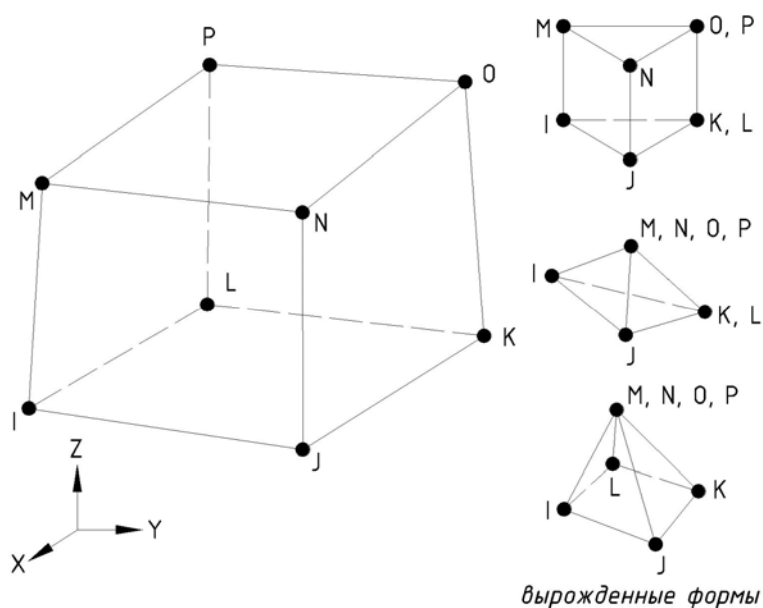


Рисунок 3.2 – Объемный элемент Solid70

Для двух остальных координатных направлений функции формы не приводятся, так как имеют аналогичную структуру записи.

На практике, при определении температурных перемещений отдельных элементов НСС, нет необходимости в решении связанной задачи теплопроводности.

Однако, как следует из системы (3.1), с одной стороны несвязанная задача теории термоупругости является частным случаем связанной задачей, а с другой стороны методика построения расчетной модели в САЕ – системе Ansys для связанной задачи оказывается более эффективной. Поэтому для подтверждения в вычислительных экспериментах выявленных закономерностей на первом этапе исследований расчетная модель была построена на элементах Solid226. Расчет показал, что в этом случае классическая экспоненциальная зависимость «температура–время» $T(t)$, описывающая тепловое состояние любого объекта, не получалась при различных вариантах геометрических и расчетных моделей. Поэтому, определение температурных перемещений было реализовано последовательным использованием двух расчетных моделей – тепловой и упругодеформационной.

3.2 Методика создания программного средства в среде САЕ-системы

Для повышения эффективности моделирования было разработано программное средство на встроенном языке программирования APDL [22, 23]. APDL (ANSYS Parametric Design Language) представляет собой параметрический язык проектирования системы Ansys, то есть является описательным языком позволяющим автоматизировать различные процедуры, начиная с решения общих задач и заканчивая построением полностью параметризованных моделей [8, 9, 24, 53, 137]. Это дает возможность рассматривать его как основу для создания программных средств, значительно упрощающих процесс инженерного анализа.

Разработанное программное средство предназначено для формирования последовательности команд системы Ansys при термомеханическом моделировании НСС. Программа выглядит как процесс ввода соответствующих исходных данных в последовательно вызываемые программные окна. Алгоритм моделирования, реализуемый этой программой, в упрощенном виде приведен на рисунке 3.3. В соответствии с приведенным алгоритмом процесс моделирования происходит следующим образом.



Рисунок 3.3 – Схема алгоритма термдеформационного моделирования несущей системы станка

На первом этапе работы программы является формирование расчетной модели НСС для теплового расчета. Последовательность формирования расчетной модели приведена на рисунке 3.4.

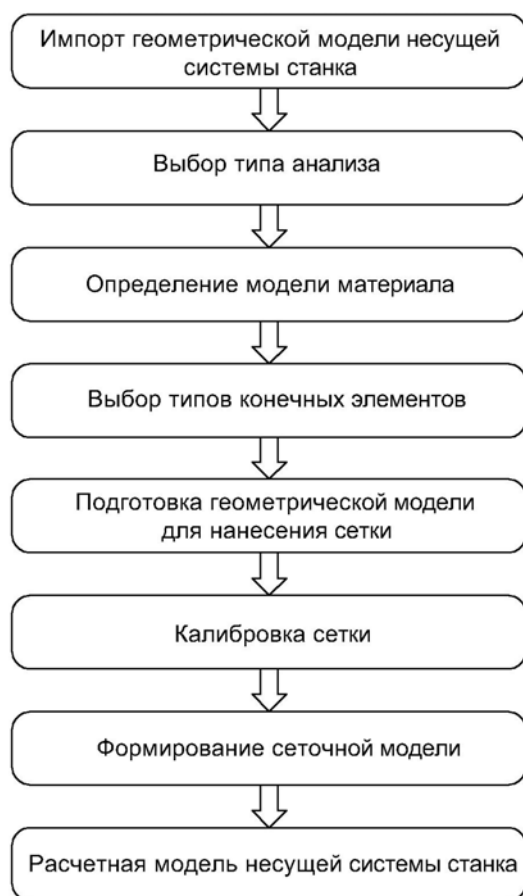


Рисунок 3.4 – Последовательность формирования расчетной модели

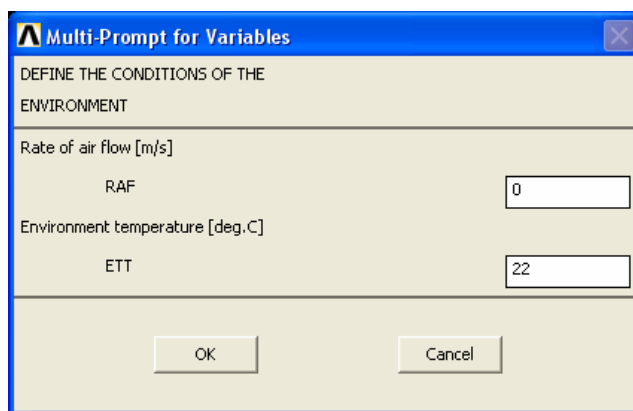
Следующим этапом является определение модели материала для деталей НСС. Создаются модели материала с необходимыми параметрами физических свойств (модуль упругости, коэффициент Пуассона, объемная плотность материала, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и коэффициент линейного расширения). Значения указанных параметров вводятся в явном виде на основе приведенных в справочной литературе [7]. Кроме того, возможно, использовать различные модели материала для различных деталей станка. При использовании различных материалов требуется сформировать группы деталей и каждую из них соотнести с необходимой моделью материала.

После определения модели материала выполняется выбор требуемых типов конечных элементов. Данный этап обеспечивает выбор типа конечных элементов необходимых для построения конечно-элементной модели НСС. Так как для выполнения расчета формируется две расчетные модели, поэтому используется два типа конечных элемента (Solid70 и Solid45). Один из этих типов элементов (Solid70) используется при формировании расчетной модели НСС для теплового расчета, а элемент (Solid45) – расчетной модели НСС для расчета температурных перемещений.

На следующем этапе идет подготовка геометрической модели для нанесения сетки. Под подготовкой здесь понимается “склеивание” сопряженных поверхностей деталей, и формирование одной общей поверхности для каждой пары сопряженных деталей.

Далее вводится приблизительное число конечных элементов в сетке. На основе этого автоматически производится расчет характеристического размера элемента и выполняется калибровка сетки. После калибровки сетки происходит формирование сеточной модели, ее результатом является образование двух расчетных моделей НСС.

Далее по ходу программы выполняется задание условий окружающей среды, которое включает в себя скорость воздушного потока (RAF) и температуру окружающей среды (ETT). На основе введенных данных происходит вычисление коэффициентов теплоотдачи. Ввод этих данных осуществляется при помощи программного окна представленного на рисунке 3.5.



DEFINE THE CONDITIONS OF THE ENVIRONMENT	
Rate of air flow [m/s] RAF	0
Environment temperature [deg.C] ETT	22
OK Cancel	

Рисунок 3.5 – Окно ввода значений условий окружающей среды и коэффициентов теплоотдачи

Следующим этапом является задание общего количества тепловых источников (NHS) с последующим выбором поверхностей задающих каждый тепловой источник. Для ввода этих данных предназначено несколько последовательно вызываемых окон, приведенных на рисунке 3.6.

The 'Prompt' dialog box has a blue title bar. The main area contains the text 'ENTER THE NUMBER OF HEAT SOURCES -> NHS = [1]'. Below this is a text input field containing the number '2'. At the bottom right is an 'OK' button.

а)

The 'Select areas' dialog box has a blue title bar. It contains two groups of radio buttons. The first group has 'Pick' (selected) and 'Unpick'. The second group has 'Single' (selected), 'Box', 'Polygon', 'Circle', and 'Loop'. Below these are labels for 'Count = 0', 'Maximum = 534', 'Minimum = 1', and 'Area No. ='. Another group of radio buttons has 'List of Items' (selected) and 'Min, Max, Inc'. Below this is a text input field containing '303'. At the bottom are buttons for 'OK', 'Apply', 'Reset', 'Cancel', 'Pick All', and 'Help'.

б)

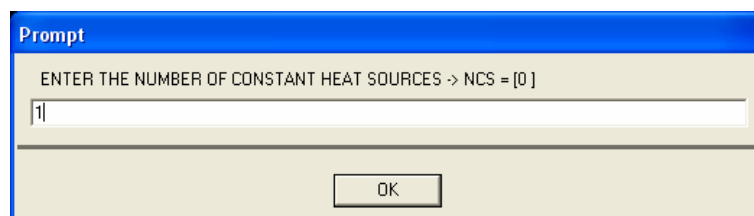
Рисунок 3.6 – Окна для ввода общего количества тепловых источников и выбора поверхностей, задающих каждый тепловой источник

После выбора поверхностей, задающих каждый тепловой источник, происходит задание величины тепловых потоков в каждом источнике. Ввод этих данных в сценарий выполняется при помощи окна на рисунке 3.7.

The 'Prompt' dialog box has a blue title bar. The main area contains the text 'ENTER THE VALUE OF HEAT FLUX AT THE HEAT SOURCE1 [w/m^2] -> Q1 = [0]'. Below this is a text input field containing the value '4000'. At the bottom right is an 'OK' button.

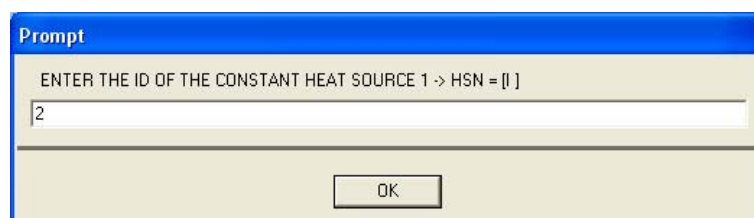
Рисунок 3.7 – Вид окна определения величин тепловых потоков в каждом источнике

На следующем этапе необходимо указать число постоянных тепловых источников и их порядковые номера. Это осуществляется с помощью последовательно выпадающих окон, приведенных на рисунках 3.8 и 3.9.



The dialog box has a blue title bar labeled 'Prompt'. The main area has a light beige background. It contains the text 'ENTER THE NUMBER OF CONSTANT HEAT SOURCES -> NCS = [0]' in a black font. Below this text is a white text input field containing the number '1'. At the bottom center is a button labeled 'OK'.

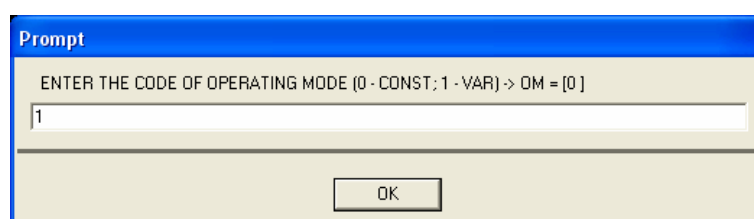
Рисунок 3.8 – Окна для ввода числа постоянных тепловых источников



The dialog box has a blue title bar labeled 'Prompt'. The main area has a light beige background. It contains the text 'ENTER THE ID OF THE CONSTANT HEAT SOURCE 1 -> HSN = []' in a black font. Below this text is a white text input field containing the number '2'. At the bottom center is a button labeled 'OK'.

Рисунок 3.9 – Окна для ввода номеров постоянных тепловых источников

Далее выполняется выбор режима работы. Он может быть непрерывным или переменным во времени (условные обозначения режимов: 0 – непрерывный, 1 – переменный). Для выбора режима работы служит окно, приведенное на рисунке 3.10.



The dialog box has a blue title bar labeled 'Prompt'. The main area has a light beige background. It contains the text 'ENTER THE CODE OF OPERATING MODE (0 - CONST; 1 - VAR) -> OM = [0]' in a black font. Below this text is a white text input field containing the number '1'. At the bottom center is a button labeled 'OK'.

Рисунок 3.10 – Окно выбора режима работы

В случае выбора переменного режима работы необходимо ввести его параметры (число циклов работы (NOC), число повторяющихся циклов (CTR) и параметры каждого цикла работы). Под заданием параметров каждого цикла работы понимается ввод времени цикла (CD) в минутах и тепловой нагрузки (HL) в процентах от исходной величины, введенной на предыдущем этапе. Для ввода этих данных предна-

значено несколько последовательно вызываемых окон, приведенных на рисунках 3.11 – 3.13.

The dialog box has a blue title bar labeled 'Prompt'. The main area is light beige and contains the text 'ENTER THE NUMBER OF OPERATING CYCLES -> NOC = [2]'. Below this text is a white input field containing the number '2'. At the bottom center is a button labeled 'OK'.

Рисунок 3.11 – Окно для ввода числа циклов работы

The dialog box has a blue title bar labeled 'Prompt'. The main area is light beige and contains the text 'ENTER THE NUMBER OF CYCLES TO REPEAT -> CTR = [0]'. Below this text is a white input field containing the number '0'. At the bottom center is a button labeled 'OK'.

Рисунок 3.12 – Окно для ввода числа повторяющихся циклов работы

The dialog box has a blue title bar labeled 'Multi-Prompt for Variables'. The main area is light beige and contains the text 'DEFINE THE PARAMETERS OF THE OPERATING CYCLE 1'. Below this text are two rows of input fields. The first row is labeled 'DURATION OF THE CYCLE 1 [min]' and contains a white input field with the value '10'. The second row is labeled 'HEAT LOAD IN % OF INITIAL VALUE' and contains a white input field with the value '100'. At the bottom are two buttons labeled 'OK' and 'Cancel'.

Рисунок 3.13 – Окно для ввода параметров каждого цикла

После выбора и задания параметров режима работы выполняется ввод параметров времени анализа. Он включает в себя время (ТТ) и шаг анализа (ТІ). Ввод этих данных выполняется при помощи окна на рисунке 3.14.

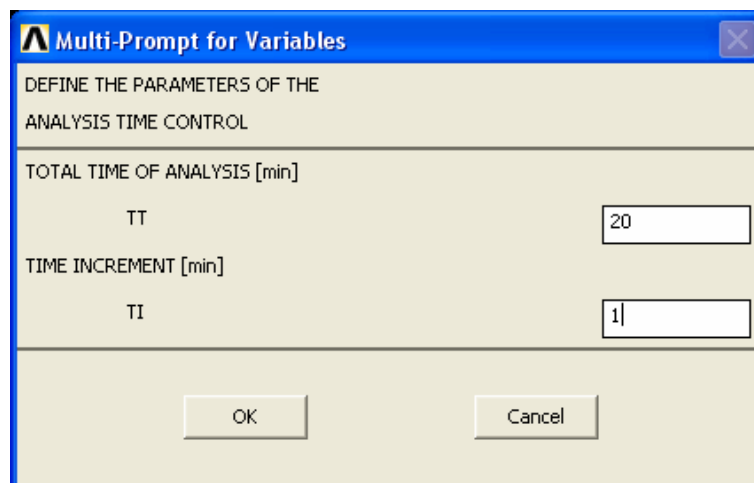


Рисунок 3.14 – Вид окна ввода параметров анализа

Далее по ходу программы выполняется ряд операций связанных с наложением тепловой нагрузки и вычислением температур в узлах модели. Данные операции реализуются в автоматическом режиме без участия пользователя. По их завершению будет сформирован файл с результатами теплового расчета (файл с расширением .rth).

Следующим этапом работы является формирование модели НСС для расчета температурных перемещений. Это включает в себя загрузку расчетной модели для расчета температурных перемещений и наложение соответствующих граничных условий для чего используются ранее полученные результаты теплового расчета. После этого выполняется вычисление перемещений в узлах модели. Данные операции выполняются в автоматическом режиме. По их завершению будет сформирован файл с результатами расчета температурных перемещений (файл с расширением .rst).

3.3 Апробация разработанного программного средства

Применение данного программного средства (ПС) позволило существенно сократить затраты на определение термоупругих перемещений во времени $\delta(t)$ за счет автоматического исполнения ряда процедур. Среди наиболее значимых процедур отметим следующие:

- формирование таблицы данных «частота вращения – время» $n(t)$;

- циклически повторяющийся расчет упругодеформационной модели при непрерывно изменяющемся времени;
- создание специального текстового файла результатов.

Без использования указанного выше ПС заполнение таблицы данных $n(t)$ и выполнение пошагового расчета (по времени) упругодеформационной модели осуществляются в интерактивном режиме. В этом случае количество файлов результатов упругодеформационной модели равно числу шагов моделирования времени. При автоматическом формировании таблицы данных $n(t)$ наибольшая эффективность достигается в случае моделирования повторно – кратковременного режима работы за счет использования операторов цикла. Использование операторов цикла позволяет сформировать специальный файл результатов «поле температурных перемещений – время», который в дальнейшем используется для построения характеристик температурных перемещений (при решении несвязанной задачи термоупругости в интерактивном режиме такой файл в САЕ – системе Ansys не формируется).

Применение любой САЕ-системы связано с построением геометрической модели исследуемого объекта. При этом время на построение геометрической модели пропорционально конструктивной сложности исследуемого объекта. Затраты времени на построение достаточно подробной геометрической модели исследуемой НСС всегда являются значительными. На начальном этапе исследований, когда требуется получить лишь качественную оценку выявленных из натурных испытаний закономерностей желательно минимизировать временные затраты на подготовку геометрической модели НСС.

Для подтверждения выявленных закономерностей на первом этапе исследований были разработаны две расчетные модели в САЕ-системе Ansys (модель несущей системы станка – НСС и модель шпиндельного узла – ШУ) и выполнены расчеты согласно циклограммам работы станка в натурных испытаниях.

Разработка геометрической модели НСС осуществлялось средствами САД-системы «КОМПАС-3D». Следующим этапом является импорт подготовленной геометрической модели НСС в систему Ansys и создание конечно-элементной модели. При этом среднее количество получаемых в модели элементов составляет 34009,

среднее количество узлов – 9676. Пример модели НСС построенной рассмотренным способом приведен на рисунке 3.15.

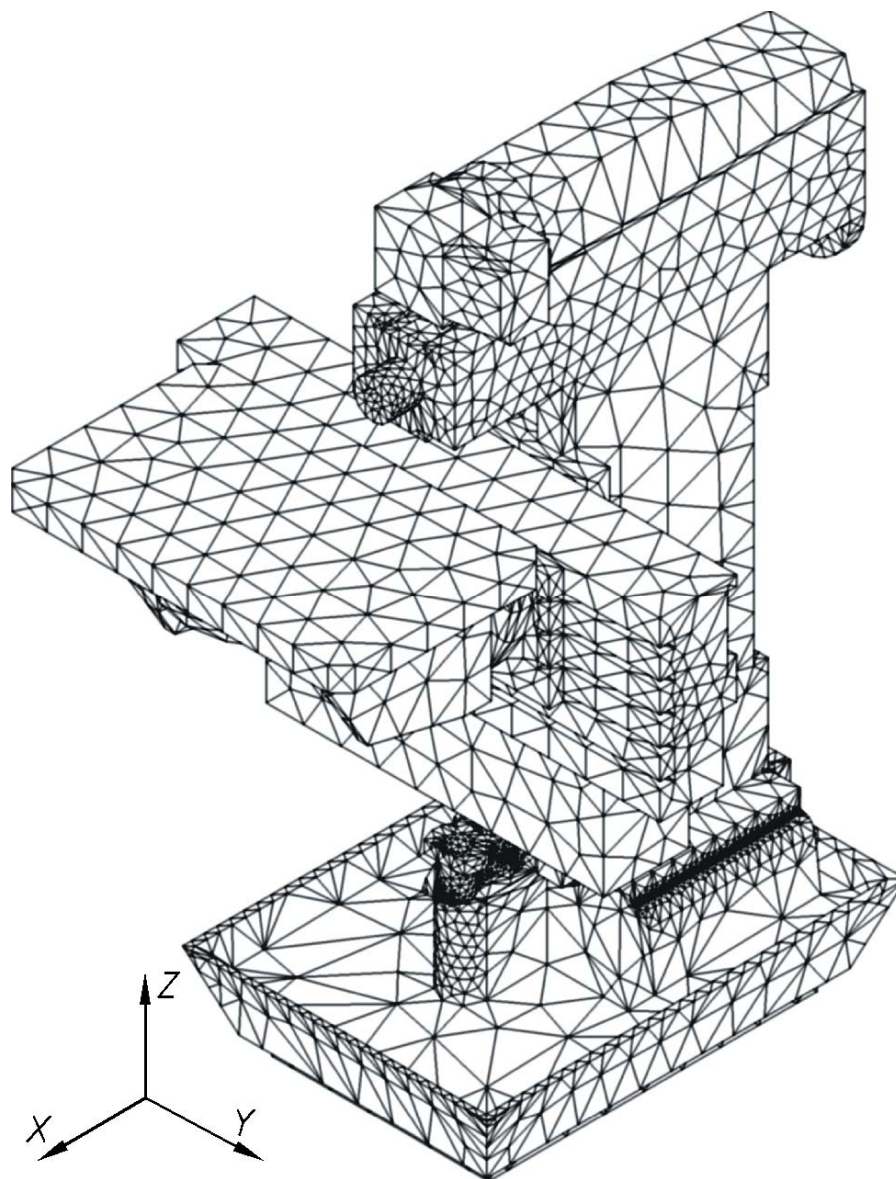


Рисунок 3.15 – Сеточная модель несущей системы станка Deckel FP3

Твердотельная модель ШУ была построена так же средствами САД-системы «КОМПАС-3D». Принятая расчетная модель является упрощенной моделью ШУ исследуемого сверлильно-фрезерного станка Deckel FP3, являющегося основным элементом станка и носителем главных тепловых источников всей НСС. При этом среднее количество получаемых в модели элементов составляет 576, среднее количество узлов – 984. Пример модели ШУ приведен на рисунке 3.16.

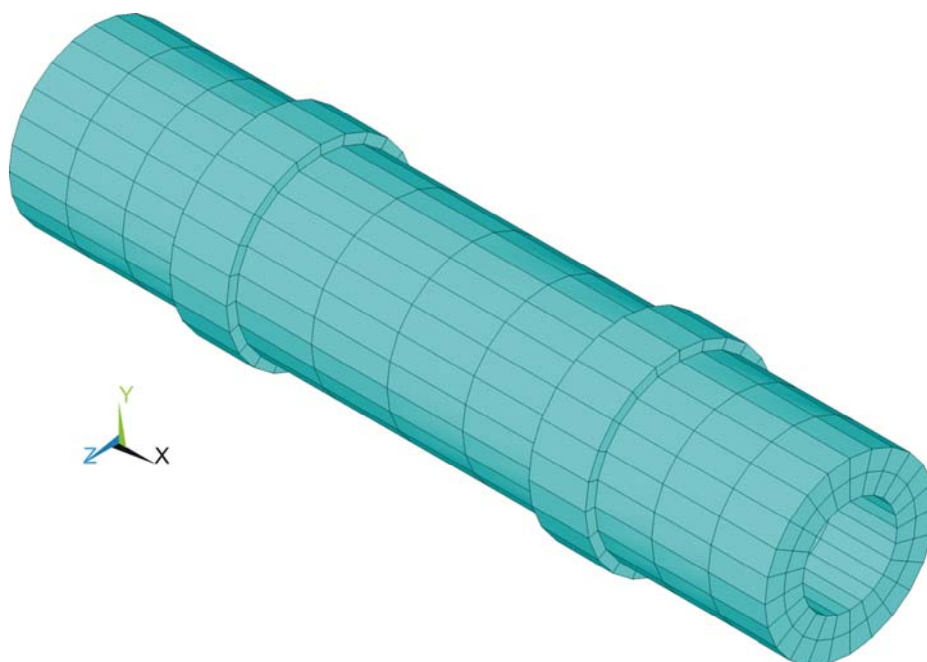


Рисунок 3.16 – Сеточная модель шпиндельного узла

Для выполнения моделирования повторно – кратковременных режимов работы исследуемого объекта были сформированы пять вариантов циклограмм – «5 – 2,5», «10 – 5», «20 – 10», «40 – 20» и «80 – 40» («нагревание – остывание», продолжительность процессов задана в минутах). Чтобы подтвердить установленные ранее экспериментальные закономерности для различных частот вращения шпинделя (1600 и 2000 об/мин) были проведены две серии вычислительных экспериментов для пяти вариантов циклограмм. В каждой серии экспериментов задавались фиксированные тепловые потоки с коэффициентом пропорциональности в серии, равным отношению частот вращения шпинделя (2000/1600).

Для наглядности представления графиков на рисунках 3.17 – 3.19 показаны расчетные тепловые характеристики модели НСС только для двух вариантов повторно – кратковременного режима работы – «10 – 5» (кривые 2 и 2') и «20 – 10» (кривые 3 и 3'). На рисунке 3.17 представлены температурные характеристики для первой серии (кривые 2, 3 и второй серий (кривые 2', 3'). На рисунках 3.18 и 3.19 представлены соответствующие характеристики температурных перемещений в узле с максимальным перемещением (кривые 2d, 3d – первая серия, 2d', 3d' – вторая серия).

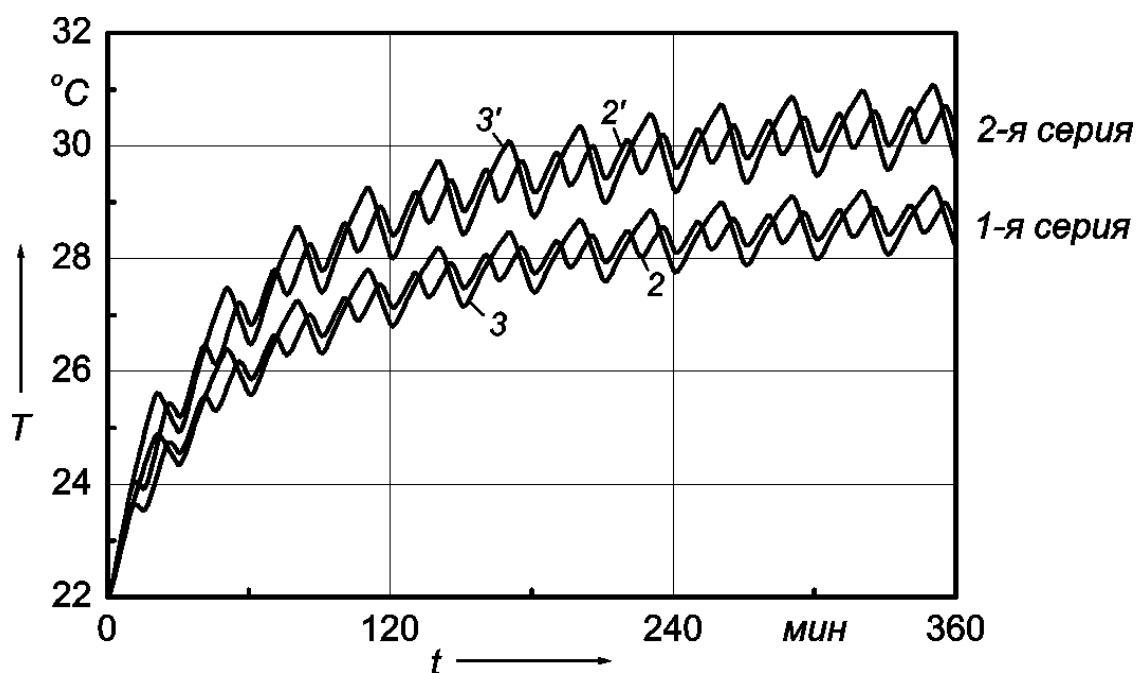


Рисунок 3.17 – Расчетные ТХ для двух вариантов повторно – кратковременного режима работы (расчетная модель – НСС)

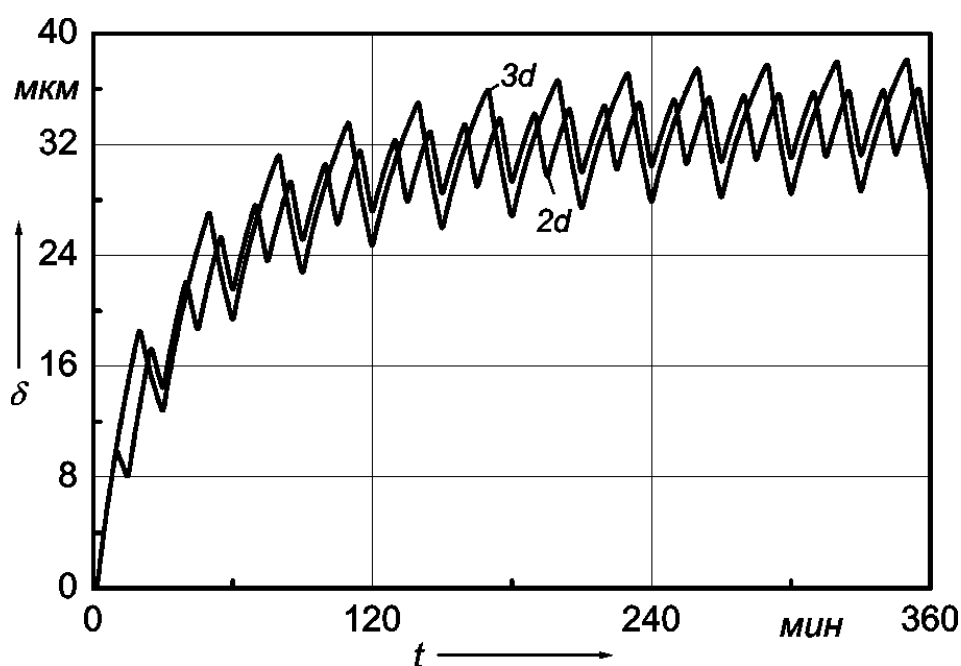


Рисунок 3.18 – Расчетные ХТП для первой серии повторно – кратковременного режима работы (расчетная модель – НСС)

На рисунке 3.20 показаны расчетные тепловые характеристики для модели ШУ только для трех вариантов повторно – кратковременного режима работы – «5 – 2,5» (кривые 1 и 1'), «10 – 5» (кривые 2 и 2') и «20 – 10» (кривые 3 и 3'). На рисунке

3.20а представлены температурные характеристики для первой серии (кривые 1, 2, 3 и второй серий (кривые 1', 2', 3'). На рисунке 3.20б представлены соответствующие характеристики температурных перемещений в узле с максимальным перемещением (кривые 1d, 2d, 3d – первая серия, 1d', 2d', 3d' – вторая серия).

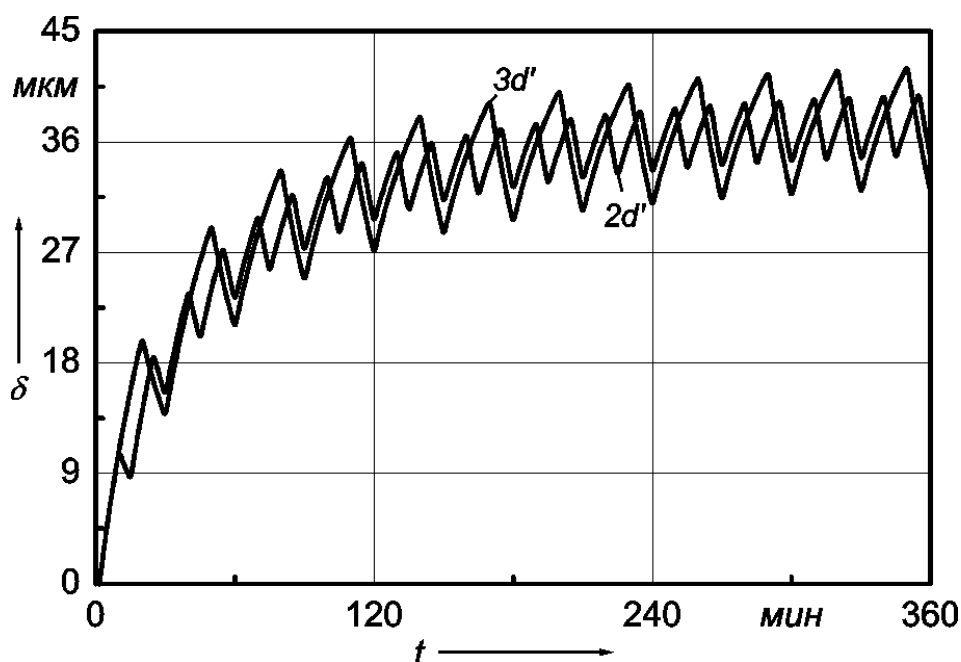
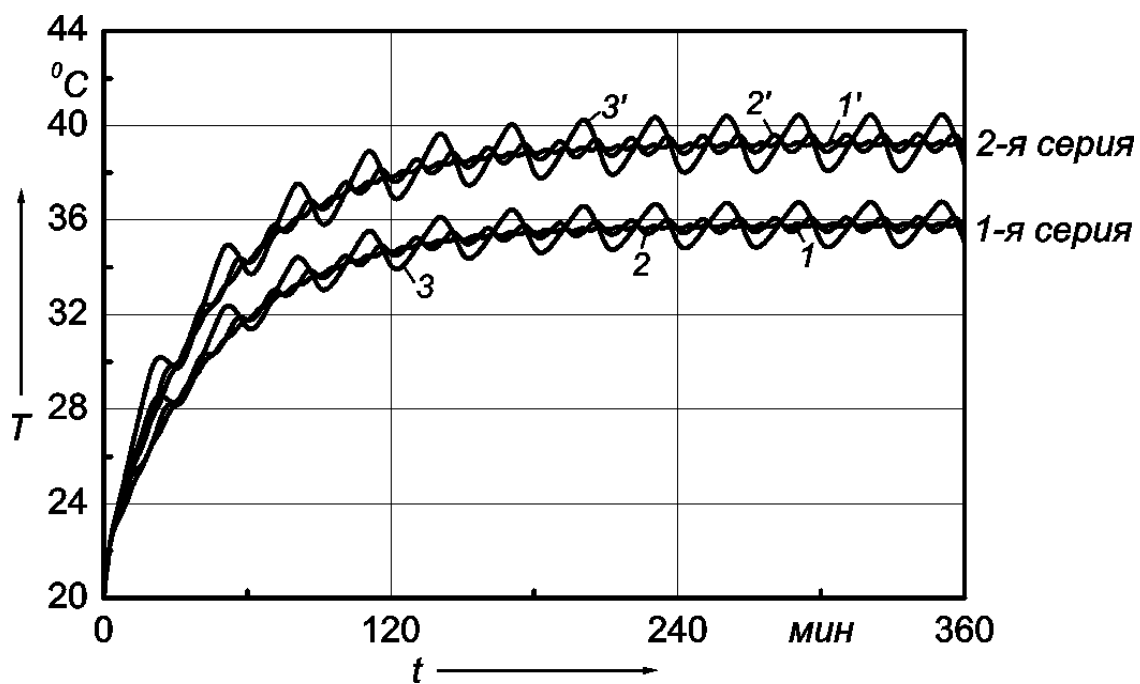


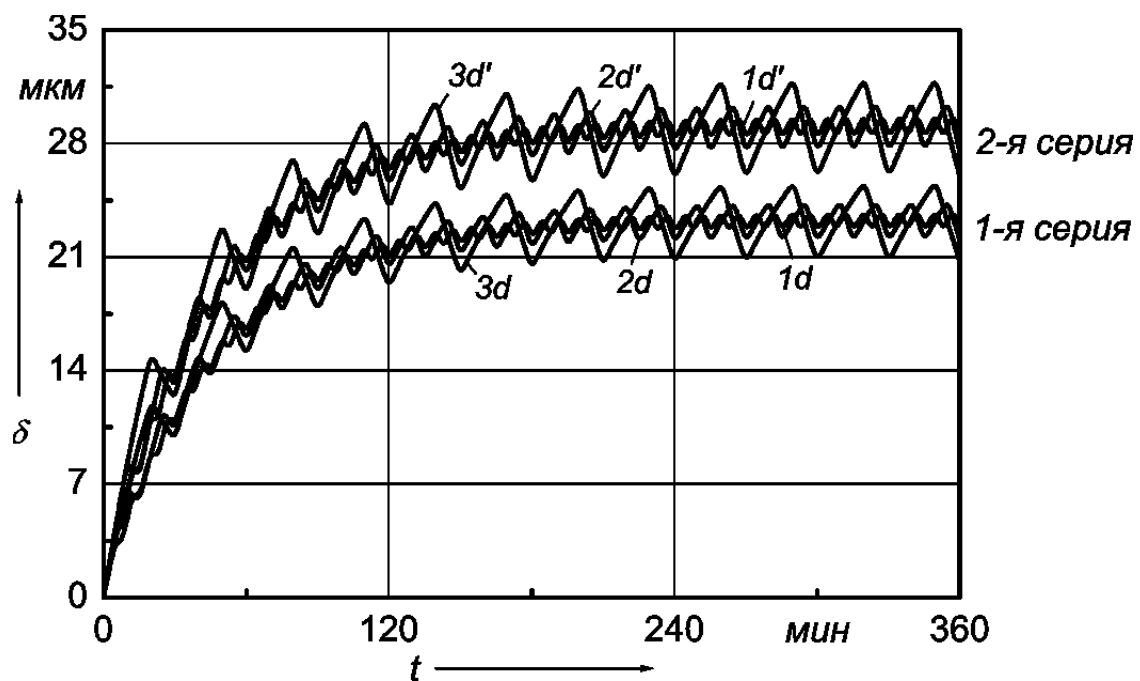
Рисунок 3.19 – Расчетные ХТП для второй серии повторно – кратковременного режима работы (расчетная модель – НСС)

Анализ тепловых характеристик показал:

- кривые в каждой серии, в зависимости от циклограммы работы объекта, характеризуются различными амплитудами «пиков» и «впадин»;
- для кривых, соответствующих циклограммам с большей длительностью непрерывного нагрева в каждом цикле, в сопоставимые по непрерывному нагреванию моменты времени, фиксируется больший уровень нагрева (или большая по амплитуде впадина);
- в серии вычислительных экспериментов с большей мощностью тепловыделения в источниках тепла кривые, в сопоставимые интервалы времени, имеют больший уровень нагрева (температурные характеристики) или уровень перемещений (характеристики температурных перемещений).



а)



б)

Рисунок 3.20 – Расчетные тепловые характеристики для трех вариантов повторно – кратковременного режима работы (расчетная модель – ШУ)

Таким образом, полученные расчетные тепловые характеристики подтвердили полученные в ходе натурных экспериментов аналогичные зависимости для станка Deckel FP3, работающего в условиях повторно-кратковременных режимов работы.

В вычислительном эксперименте была реализована серия циклограмм, подобная представленным на рисунке 3.21а – 3.21ж. Подобие заключалось в задании тепловых потоков, мощность которых пропорциональна частотам вращения шпинделя металлорежущего станка, принятым в циклограммах.

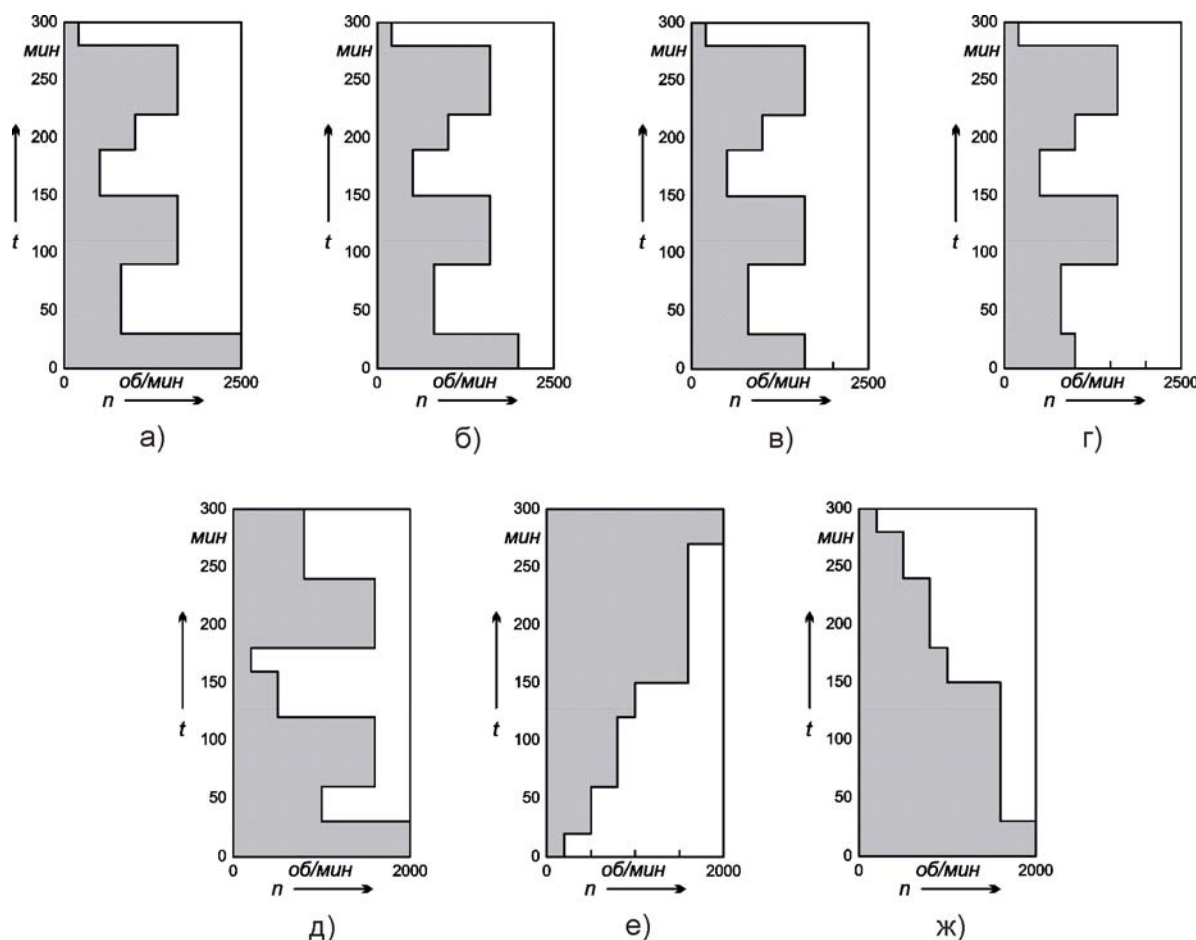
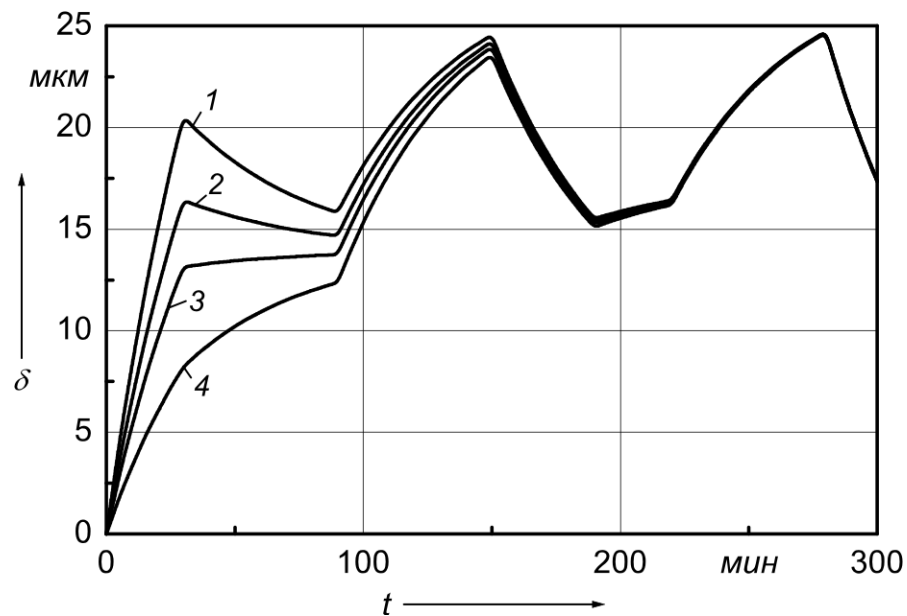


Рисунок 3.21 – Циклограммы работы станка

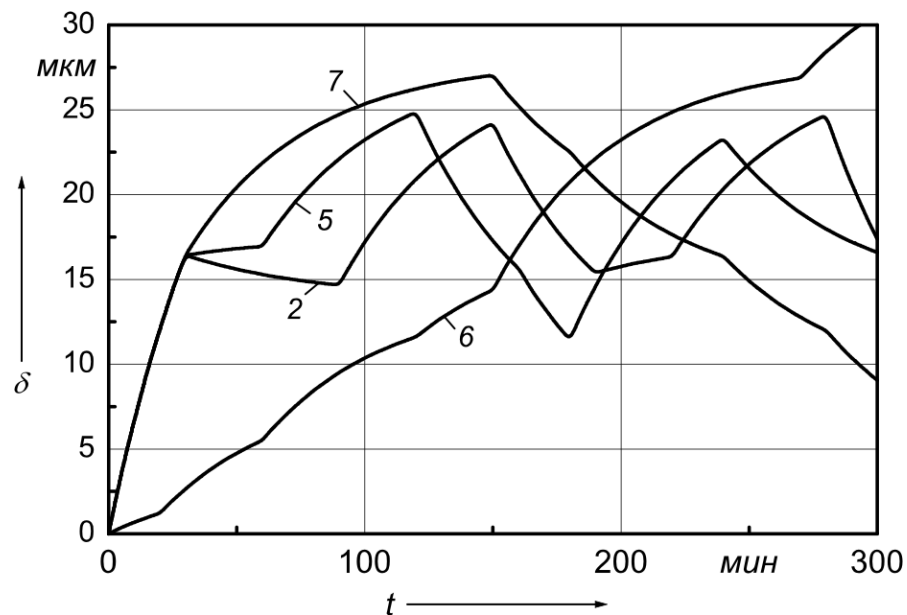
При задании таблиц тепловых потоков $n(t)$ в четырех вариантах варьировалась плотность теплового потока на первом участке циклограммы нагревания объекта. Полученные расчетные ХТП приведены на рисунках 3.22а и 3.23а. Нумерация кривых на рисунке соответствует последовательности следования циклограмм (3.21а – 3.21г.).

В этом случае температурные перемещения пришли в одну точку. Это объясняется достаточной суммарной длительностью процессов нагревания и охлаждения, сопоставимой со временем термостабилизации (технический аналог термина теории

теплопроводности – время температурной стабилизации). На практике это означает, что при большой длительности процессов обработки на станке даже значительные изменения в режимах резания в отдельные интервалы времени вызывают лишь локальные изменения температурных перемещений рабочих органов.



а)



б)

Рисунок 3.22 – Расчетные ХТП (расчетная модель – ШУ)

На рисунках 3.22б и 3.23б представлены результаты вычислительного эксперимента для четырех вариантов циклограмм, представленных на рисунках 3.21б, 3.21д – 3.21ж.

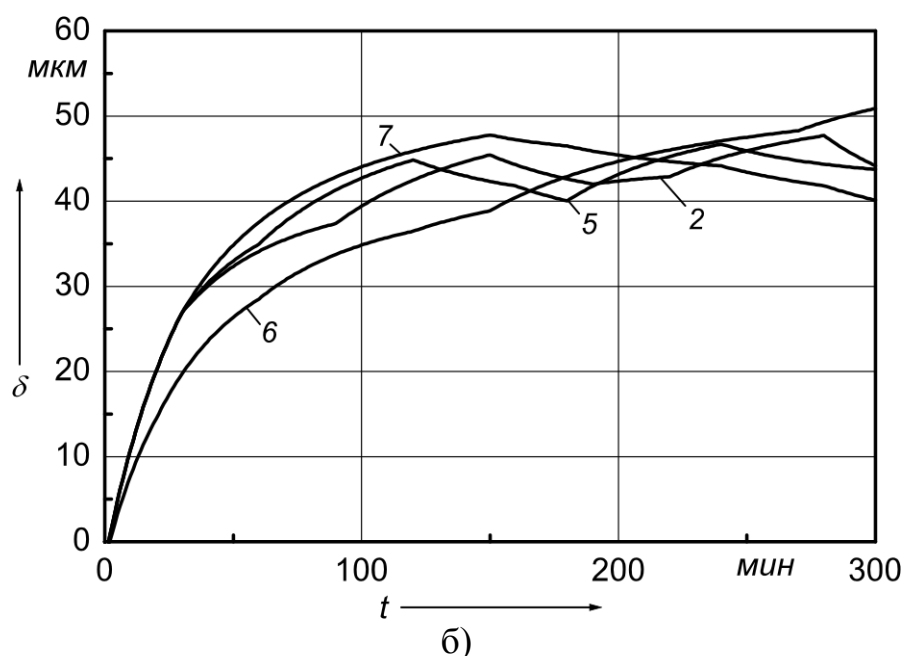
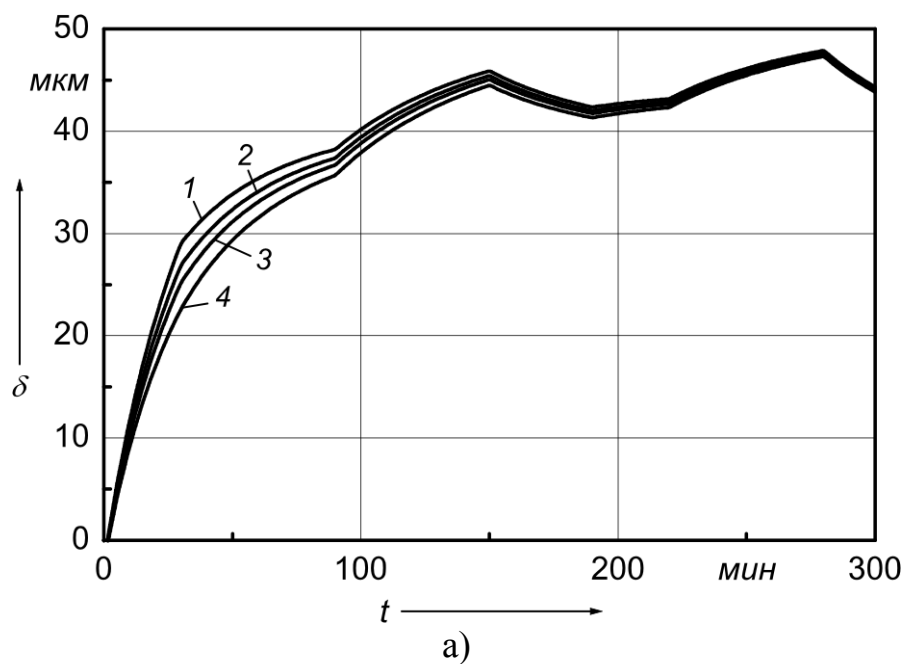


Рисунок 3.23 – Расчетные ХТП (расчетная модель – НСС)

Вычислительные эксперименты для циклограмм работы станка, не характеризующихся периодичностью тепловых режимов, показали следующее:

- наибольшие температурные перемещения достигаются при реализации технологического процесса механообработки, в котором осуществляется непрерывный рост скоростей резания;
- наименьшие температурные перемещения, напротив, формируются в технологическом процессе механообработки, в котором скорости резания имеют нисходящий характер;

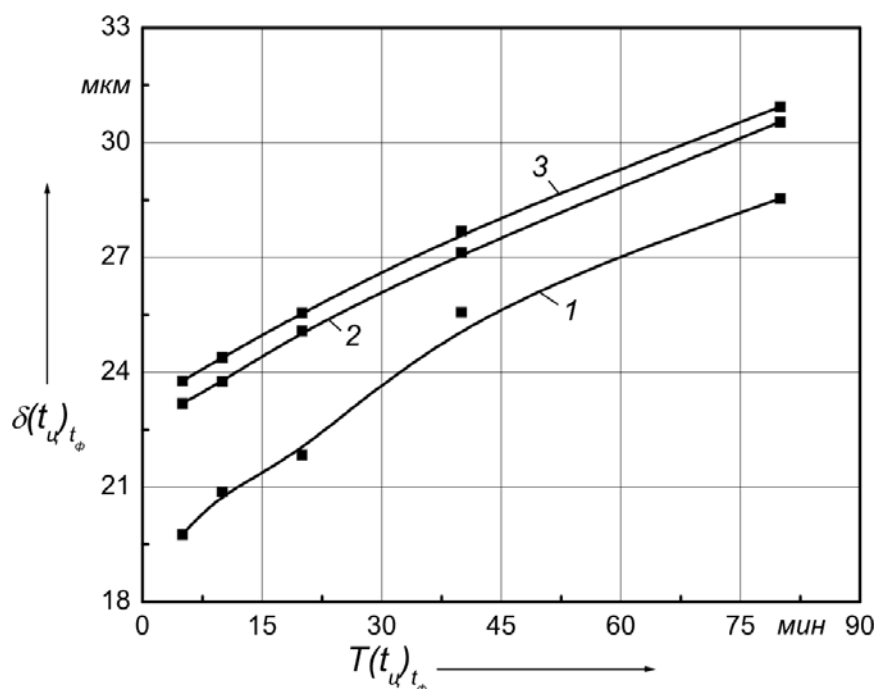
– усредненные значения температурных перемещений справедливы для технологических процессов механообработки, характеризующихся хаотичным изменением скоростей резания; при этом усредненные значения температурных перемещений для различных циклограмм формируют некоторое поле рассеяния.

Дополнительно, из вычислительных экспериментов были построены зависимости «температура в фиксированный момент времени – время непрерывного нагрева» – $T(t_u)_{t_\phi}$ и «температурное перемещение в фиксированный момент времени – время непрерывного нагрева» – $\delta(t_u)_{t_\phi}$:

где t_u – время непрерывного нагрева в каждом цикле;

t_ϕ – фиксированный интервал времени, в течение которого происходил только нагрев объекта.

На рисунке 3.24 представлены аппроксимирующие функции $\delta(t_u)_{t_\phi}$, построенные по расчетным данным (символ «квадрат») для трех значений параметра t_ϕ : 80, 160 и 240 мин (соответствующая нумерация кривых – 1, 2 и 3).



t_u – время непрерывного нагрева в цикле, t_ϕ – фиксированный интервал времени, в течение которого происходил только нагрев объекта

Рисунок 3.24 – Аппроксимирующие функции $\delta(t_u)_{t_\phi}$

Вид аппроксимирующей функции $T(t_u)_{t_\phi}$ идентичен функции $\delta(t_u)_{t_\phi}$. Их анализ показал:

- наблюдается близкая к линейной зависимости закономерность «длительность непрерывного нагрева в цикле – уровень температурных перемещений (также температур)»;
- градиент функций $\delta(t_u)_{t_\phi}$ и $T(t_u)_{t_\phi}$ по времени позволяет с достаточной точностью оценить время температурной стабилизации исследуемого объекта.

Анализ проведенных исследований показал, что использование современной системы моделирования физических процессов позволяет устанавливать закономерности изменения тепловых характеристик для станка, работающего в условиях переменных режимов, и с определенной точностью прогнозировать их количественные значения. Получение возможности прогнозирования тепловых характеристик с необходимой точностью определяет предпосылки для разработки алгоритмов компенсации температурной погрешности станка или подобных объектов, для которых актуальны тепловые перемещения.

4 Метод прогнозирования тепловых характеристик станка

Принципиальным отличием предлагаемого метода прогнозирования тепловых характеристик является отсутствие традиционных способов построения функциональных кривых, основанных на некотором их аналитическом описании. 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.

4.1 Базовые уравнения метода

Математическую основу метода составляет решение дифференциального уравнения теплопроводности [32, 52]. Особенностью получения аналитического решения для уравнения теплопроводности является использование модального подхода [62]. Это связано с тем, что тепловое состояние станка НСС описывается системой уравнений. Система уравнений проще всего решается с использованием теоретического модального анализа. Его определяющей особенностью является использование для решения систем связанных уравнений преобразования координат – замена физических координат нормированными модальными. В этом случае связанная система уравнений заменяется совокупностью несвязанных дифференциальных уравнений первого порядка.

Ранее была представлена система уравнений в матричной форме, описывающая тепловое состояние станка, в виде [116]:

$$[C]\{\dot{T}(t)\} + [K]\{T(t)\} = \{F(t)\} \quad (4.1)$$

Переход от связанных координат к несвязанным производится с помощью преобразования:

$$\{T(t)\} = [\Phi]\{u(t)\} \quad (4.2)$$

где $[\Phi] = [\{\varphi_1\}, \dots, \{\varphi_k\}, \dots, \{\varphi_n\}]$ - модальная матрица;
 $\{u(t)\}$ – вектор температур в главных координатах.

Далее, в основном, аргумент « t », для краткости изложения будет опускаться; будет использоваться только в том случае, когда необходимо подчеркнуть зависимость от времени.

Модальная матрица $[\Phi]$ состоит из собственных векторов $\{\varphi_k\}$, соответствующих собственным значениям λ_k , полученным в результате решения обобщенной задачи о собственных значениях для системы (4.1) без правой части:

$$[K]\{\varphi_k\} = \lambda_k[C]\{\varphi_k\} \quad (4.3)$$

Собственные вектора обладают свойствами ортогональности по отношению к матрицам $[C]$ и $[K]$:

$$[\Phi]^T[C][\Phi] = \text{diag}(E); \quad [\Phi]^T[K][\Phi] = \text{diag}(\lambda_k) \quad (4.4)$$

где $\text{diag}(E), \text{diag}(\lambda_k)$ - единичная диагональная матрица и диагональная матрица собственных значений.

Используя преобразование (4.2) и свойство (4.4), умножив слева выражение (4.1) на $[\Phi]^m$, получим:

$$\overset{\circ}{\{u\}} + \text{diag}(\lambda_k)_{k=1,n} \cdot \{u\} = \{P\} \quad (4.5)$$

где $\{P\} = \{p_1, \dots, p_k, \dots, p_n\}$ – вектор тепловой нагрузки в нормальных координатах;
 n – число собственных векторов.

Уравнение теплопроводности по каждой координате u_k имеет вид:

$$\overset{\circ}{u}_k + \lambda_k \cdot u = P_k \quad (4.6)$$

Решение уравнения (4.6) находится методом Лагранжа. При этом принимается, что решение однородного дифференциального уравнения, соответствующего (4.6), имеет вид:

$$u_k = c_1(t)e^{-\lambda_k t} \quad (4.7)$$

где $c_1(t)$ – произвольная функция времени.

После подстановки (4.7) в (4.6) получим:

$$\overset{\circ}{c}_1(t) \cdot e^{-\lambda_k t} = p_k \quad (4.8)$$

Откуда после интегрирования получаем решение в виде:

$$u_k = \frac{p_k}{\lambda_k} + c_2 e^{-\lambda_k t} \quad (4.9)$$

Произвольная постоянная c_2 определяется из начальных условий. Уравнение (4.1) и вид решения (4.7) справедливы для обоих процессов: нагревания станка и его остывания. Отличие заключается в структуре тепловой нагрузки $\{F\}$. При остывании в векторе $\{F\}$ отсутствует приток тепловых потоков от источников тепла. На отдельных поверхностях станка интенсивность конвективного охлаждения может быть снижена из-за отсутствия вращения или перемещения деталей, создающих дополнительный отвод тепла. На этом основании строится различие в задании начальных условий при определении произвольной постоянной c_2 в условиях нагревания и остывания станка.

При нагревании станка в начальный момент времени t_0 принимается известным u_0 , тогда произвольная постоянная c_2 имеет вид:

$$c_2 = u_0 - \frac{p_k}{\lambda_k} \quad (4.10)$$

Подставив (4.10) в (4.9), получим решение по одной координате:

$$u_k = \frac{p_k}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + u_0 e^{-\lambda_k t} \quad (4.11)$$

При остывании станка в начальный момент времени t_0 принимается известным максимальный уровень температур, а значит $u_{\max}$. Решение (4.11) получает вид:

$$u_k(t) = \frac{p_{0k}}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + u_{\max} e^{-\lambda_k t} \quad (4.12)$$

где p_{0k} – тепловая нагрузка при остывании.

Таким образом, решение в физических координатах с учетом использованного преобразования (4.2) имеет вид:

– при нагревании:

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijk} f_j (1 - e^{-\lambda_k t}) + \sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_{ok} e^{-\lambda_k t}, \quad (4.13)$$

– при остывании:

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ijk} f_{0j} (1 - e^{-\lambda_k t}) + \sum_{k=1}^n \varphi_{ik} u_{\max k} e^{-\lambda_k t}, \quad (4.14)$$

где $a_{ijk} = \frac{\varphi_i \cdot \varphi_j}{\lambda_k}$ – модальная температурная податливость.

В упрощенном виде соотношения (4.13) и (4.14) для температурной характеристики $T_i(t)$ могут быть представлены в виде:

– нагревание:

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n A_{ik} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n B_{ik} e^{-t/\tau_k}; \quad (4.15)$$

$$A_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ijk} f_j; \quad B_{ik} = \varphi_{ik} u_0; \quad \tau_k = 1/\lambda_k$$

или

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n m_{ik}; \quad m_{ik} = A_{ik} (1 - e^{-t/\tau_k}) + B_{ik} e^{-t/\tau_k} \quad (4.16)$$

– остывание:

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n B_{ik} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n A_{ik} e^{-t/\tau_k}; \quad (4.17)$$

$$A_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ijk} f_{0j}; \quad B_{ik} = \varphi_{ik} u_{\max}$$

или

$$T_i(t) = \sum_{k=1}^n m_{0ik}; \quad m_{0ik} = B_{ik} (1 - e^{-t/\tau_k}) + A_{ik} e^{-t/\tau_k} \quad (4.18)$$

где m_{ik} – отдельная k -ая температурная мода при нагревании;

m_{0ik} – отдельная k -ая температурная мода при остывании;

A_{ik}, B_{ik} — уровни установившихся и начальных температур для каждой температурной моды;

τ_k — тепловая постоянная каждой температурной моды;

t_o — интервал времени, характеризующий запаздывание;

t — время.

Под температурной модой понимается фиксированная компонента температурной характеристики $T_i(t)$, характеризующаяся соответствующей тепловой постоянной времени.

Инерционность процесса нагрева можно учесть введением параметра «время запаздывания» [141]:

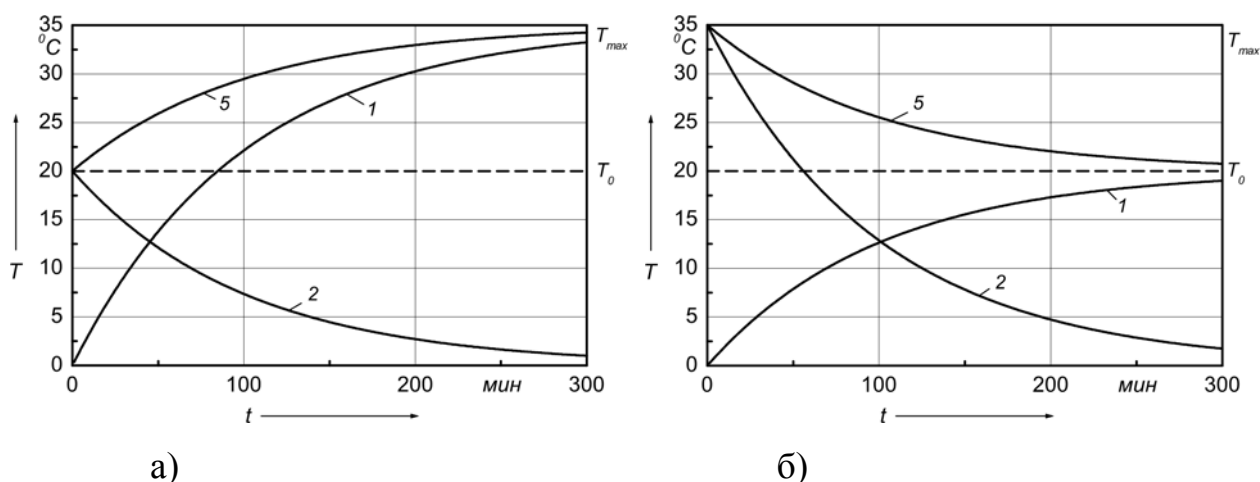
$$\text{— нагревание: } T_i(t) = \sum_{k=1}^n A_{ik} (1 - e^{-(t-t_0)/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n B_{ik} e^{-(t-t_0)/\tau_k} ; \quad (4.19)$$

$$\text{— остывание: } T_i(t) = \sum_{k=1}^n B_{ik} (1 - e^{-(t-t_0)/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n A_{ik} e^{-(t-t_0)/\tau_k} ; \quad (4.20)$$

В отдельных случаях [76, 84] для тепловых характеристик станков достаточно использовать одну температурную моду. В этом случае характеристики описываются в виде:

$$\begin{aligned} T_i(t) &= A_i (1 - e^{-t/\tau_k}) + B_i e^{-t/\tau_k} ; \\ T_i(t) &= B_k (1 - e^{-t/\tau_k}) + A_i e^{-t/\tau_k} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Учитывая, что температурные перемещения линейно связаны с температурой, поэтому все выше приведенные зависимости для температуры справедливы и для перемещений.



1 – нагрев от 0°C до $T_{\max}$; 2 – остывание от T_0 ; 3 – нагрев от 0°C до T_0 ; 4 – остывание от $T_{\max}$; 5 – температурная характеристика

Рисунок 4.1 – Схемы формирования ТХ при нагревании и остывании

Характеристика температурных перемещений для случая нескольких температурных мод имеет вид по ξ -ой координате:

$$\text{– нагревание: } \delta_{\xi}(t) = \sum_{k=1}^n A_{\xi k}^{\delta} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n B_{\xi k}^{\delta} e^{-t/\tau_k}; \xi \rightarrow 1, 2, 3 \quad (4.22)$$

$$\text{– остывание: } \delta_{\xi}(t) = \sum_{k=1}^n B_{\xi k}^{\delta} (1 - e^{-t/\tau_k}) + \sum_{k=1}^n A_{\xi k}^{\delta} e^{-t/\tau_k} \quad (4.23)$$

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

4.2 Математическое описание прогнозируемых характеристик

Основной научной гипотезой метода является: возможность построение прогнозируемой тепловой характеристики для произвольной циклограммы по отдельным участкам экспериментальных тепловых характеристик, полученных из натур-

ных экспериментов для частоты вращения шпинделя, соответствующей данному участку циклограммы.

Если циклограмму формально представить в виде совокупности пар элементов «частота вращения – n » и «интервалы времени – t »:

$$R_{\eta} = \langle n_{\eta 1}, t_{\eta 1}; n_{\eta 2}, t_{\eta 2}; \dots; n_{\eta \zeta}, t_{\eta \zeta}; \dots; n_{\eta s}, t_{\eta s} \rangle, \quad \zeta \rightarrow 1, \dots, s, \eta \rightarrow 1, \dots, S \quad (4.24)$$

где s – число участков циклограммы;

S – число циклограмм;

$t_{\eta \zeta}$ – интервал времени, то:

– температурная характеристика $T_i(t)$ в i – ой точке НСС имеет вид:

$$\begin{aligned} T_{i\eta}(t) = & \langle T_{i\eta 1}(t), [t_{\eta 11}, t_{\eta 12}]; T_{i\eta 2}(t), [t_{\eta 21}, t_{\eta 22}]; \\ & \dots; T_{i\eta \zeta}(t), [t_{\eta \zeta 1}, t_{\eta \zeta 2}]; \dots; T_{i\eta s}(t), [t_{\eta s 1}, t_{\eta s 2}] \rangle, \\ & i \rightarrow 1, \dots, \gamma, \end{aligned} \quad (4.25)$$

где γ – число термодатчиков, устанавливаемых на НСС,

– характеристика температурных перемещений:

$$\begin{aligned} \delta_{\xi \eta}(t) = & \langle \delta_{\xi \eta 1}(t), [t_{\eta 11}, t_{\eta 12}]; \delta_{\xi \eta 2}(t), [t_{\eta 21}, t_{\eta 22}]; \\ & \dots; \delta_{\xi \eta \zeta}(t), [t_{\eta \zeta 1}, t_{\eta \zeta 2}]; \dots; \delta_{\xi \eta s}(t), [t_{\eta s 1}, t_{\eta s 2}] \rangle, \end{aligned} \quad (4.26)$$

здесь $[t_{\eta \zeta 1}, t_{\eta \zeta 2}]$ – интервал времени ζ -ого участка η -ой циклограммы.

В выражениях (4.25) и (4.26), согласно заявленной научной гипотезе, отдельные участки характеристик $T_{i\zeta}(t)$ и $\delta_{\xi \zeta}(t)$ циклограммы R образованы из ранее полученных экспериментальных характеристик $T_i(t)$ и $\delta_{\xi}(t)$ на соответствующих частотах n_{ζ} .

Для проверки этой гипотезы были использованы результаты пятидесяти циклограмм, представляющие собой комбинацию восьми частот вращения шпинделя: 200, 500, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 и 2500 об/мин, в соответствии с (4.24).

Проверка гипотезы проводилась следующим образом:

- по технологическому процессу формировалась циклограмма исследуемого станка R_{η} ;

- по данным натурного или вычислительного эксперимента строилась совокупность эталонных тепловых характеристик $T_{\gamma\eta}^{\vartheta}(t)$ и $\delta_{1,\eta}^{\vartheta}, \delta_{2,\eta}^{\vartheta}, \delta_{3,\eta}^{\vartheta}$ для циклограммы R_{η} ;

- по данным натурного или вычислительного эксперимента строилась совокупность тепловых характеристик $T_{\gamma s}(t)$ и $\delta_{1,s}, \delta_{2,s}, \delta_{3,s}$ для s - вариантов частот вращения шпинделя; тепловые характеристики включали два участка: нагревание станка и его остывание;

- для каждого участка тепловых характеристик $T_{\gamma\eta}^{\vartheta}(t)$ и $\delta_{1,\eta}^{\vartheta}, \delta_{2,\eta}^{\vartheta}, \delta_{3,\eta}^{\vartheta}$, определяемых циклограммой R_{η} , в графическом редакторе подбирались участки соответствующих тепловых характеристик $T_{\gamma s}(t)$ и $\delta_{1,s}, \delta_{2,s}, \delta_{3,s}$ по кривизне и из полученных участков собирались «прогнозируемые тепловые характеристики» $T_{\gamma\eta}(t)$ и $\delta_{1,\eta}, \delta_{2,\eta}, \delta_{3,\eta}$.

- выполнялся анализ точности построенных и эталонных характеристик.

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.

Проведенные исследования позволили создать математические модели тепловых характеристик в виде кусочных функций для каждого участка циклограммы R_{η} .

Математические модели имеют вид:

– для первого типа циклограмм:

$$\hat{T}_y(t) = \begin{cases} T_1(t), & t \leq t_{1y} \\ T_2(t-t_2), & t_2 = t_{1y} - t'_{1y}; \\ & t'_{1y} \rightarrow T_2(t'_{1y}) = T_y(t_{1y}), \\ \dots & \dots \\ T_n(t-t_n), & t_n = t_{n-1y} - t'_{n-1y}; \\ & t'_{n-1y} \rightarrow T_n(t'_{n-1y}) = T_y(t_{n-1y}), \end{cases} \quad t_{1y} \leq t \leq t_{2y} \quad (4.27)$$

и

$$\hat{\delta}_y(t) = \begin{cases} \delta_1(t), & t \leq t_{1y} \\ \delta_2(t-t_2), & t_2 = t_{1y} - t'_{1y}; \\ & t'_{1y} \rightarrow \delta_2(t'_{1y}) = \delta_y(t_{1y}), \\ \dots & \dots \\ \delta_n(t-t_n), & t_n = t_{n-1y} - t'_{n-1y}; \\ & t'_{n-1y} \rightarrow \delta_n(t'_{n-1y}) = \delta_y(t_{n-1y}), \end{cases} \quad t_{1y} \leq t \leq t_{2y} \quad (4.28)$$

где $\hat{T}_y(t)$ $\hat{\delta}_y(t)$ – прогнозируемые значения температур и перемещений;

$T_1(t), T_2(t), T_n(t)$ и $\delta_1(t), \delta_2(t), \delta_n(t)$ – экспериментальные температурные характеристики и характеристики температурных перемещений нагревания станка для фиксированных частот вращения на первом, втором и n – ом интервале циклограммы;

$T_1^0(t), T_{n-1}^0(t)$ и $\delta_1^0(t), \delta_{n-1}^0(t)$ – экспериментальные температурные характеристики и характеристики температурных перемещений при остывании станка для фиксированных частот вращения на первом и $n-1$ – ом интервале циклограммы;

$t_{1y}, t_{2y}, t_{3y}, t_{n-2y}, t_{n-1y}, t_{ny}, t'_{1y}, t'_{2y}, t_{01}, t_{02}, t'_{01}, t'_{02}$ – фиксированные моменты времени;

n – число участков циклограмм.

– для второго типа циклограмм:

$$\hat{T}_u(t) = \begin{cases} T_1(t) & t \leq t_{1u} \\ T_1^0(t) & t_{1u} < t \leq t_{2u} \\ T_1(t-t_2) & t_2 = t_{2u} - t'_{1u}; t_{2u} < t \leq t_{3u} \\ & t'_{1u} \rightarrow T_1(t'_{1u}) = \hat{T}_u(t_{2u}) \\ \dots & \dots \\ T_1(t) & t_{n-3u} < t \leq t_{n-2u} \\ T_1^0(t) & t_{n-2u} < t \leq t_{n-1u} \\ T_1(t-t_2) & t_{n-1} = t_{n-1u} - t'_{n-2u}; t_{n-1u} < t \leq t_{nu} \\ & t'_{n-1u} \rightarrow T_1(t'_{n-1u}) = \hat{T}_u(t_{nu}) \end{cases} \quad (4.29)$$

и

$$\hat{\delta}_u(t) = \begin{cases} \delta_1(t) & t \leq t_{1u} \\ \delta_1^0(t) & t_{1u} < t \leq t_{2u} \\ \delta_1(t-t_2) & t_2 = t_{2u} - t'_{1u}; t_{2u} < t \leq t_{3u} \\ & t'_{1u} \rightarrow \delta_1(t'_{1u}) = \hat{\delta}_u(t_{2u}) \\ \dots & \dots \\ \delta_1(t) & t_{n-3u} < t \leq t_{n-2u} \\ \delta_1^0(t) & t_{n-2u} < t \leq t_{n-1u} \\ \delta_1(t-t_2) & t_{n-1} = t_{n-1u} - t'_{n-2u}; t_{n-1u} < t \leq t_{nu} \\ & t'_{n-1u} \rightarrow \delta_1(t'_{n-1u}) = \hat{\delta}_u(t_{nu}) \end{cases} \quad (4.30)$$

– для третьего типа циклограмм:

$$\hat{T}_u(t) = \begin{cases} T_1(t), & t \leq t_{1u} \\ T_2(t) - T_{02}(t) + T_1^0(t), & T_{02}(t_{1u}) = T_2(t_{1u}), & t_{1u} \leq t \leq t_{2u} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_n(t) - T_{0n}(t) + T_{n-1}^0(t), & T_{0n}(t_{n-1u}) = T_n(t_{n-1u}), & t_{n-1u} \leq t \leq t_{nu} \end{cases} \quad (4.31)$$

И

$$\hat{\delta}_u(t) = \begin{cases} \delta_1(t), & t \leq t_{1u} \\ \delta_2(t) - \delta_{02}(t) + \delta_1^0(t), & \delta_{02}(t_{1u}) = T_2(t_{1u}), \quad t_{1u} \leq t \leq t_{2u} \\ \dots & \dots \\ \delta_n(t) - \delta_{0n}(t) + \delta_{n-1}^0(t), & \delta_{0n}(t_{n-1u}) = \delta_n(t_{n-1u}), \quad t_{n-1u} \leq t \leq t_{nu} \end{cases} \quad (4.32)$$

Первый тип циклограмм. Схема формирования температурной характеристики для циклограммы первого типа приведена на рисунке 4.2. Здесь представлен принцип формирования тепловой характеристики для циклограммы, состоящей из двух участков. Первый участок имеет длительность $[0, t_{1u}]$, второй – $[t_{1u}, t_{2u}]$. Экспериментальные характеристики $T_1(t)$ и $T_2(t)$, для соответствующих режимов работы станка – пунктирные линии являются заранее заданными.

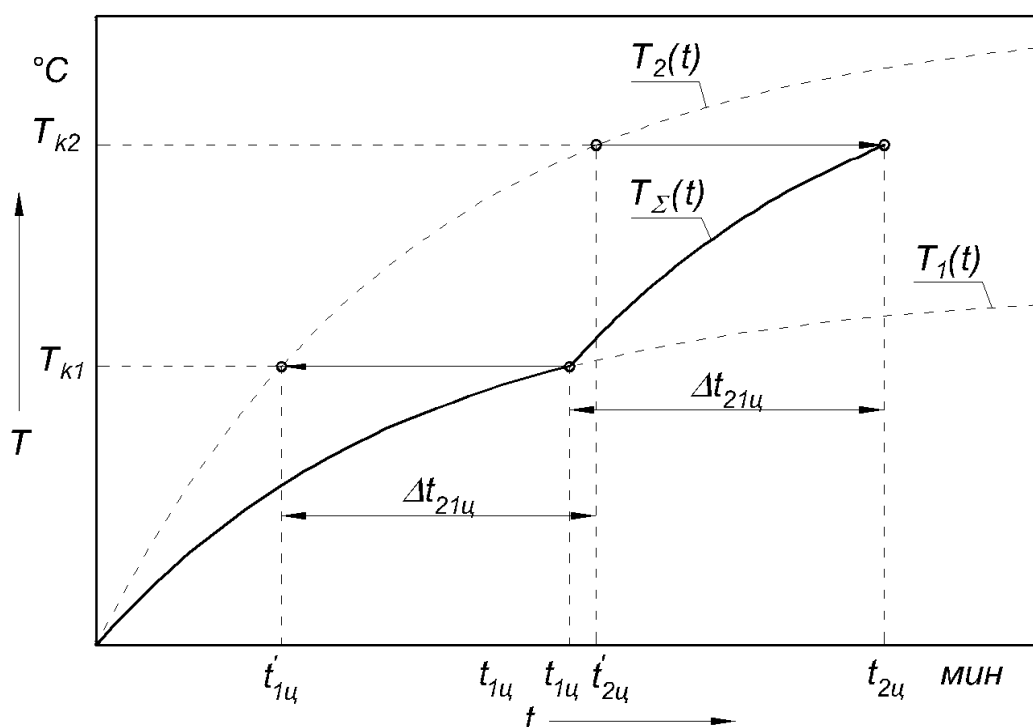


Рисунок 4.2 – Схема формирования ТХ для циклограммы первого типа

Для первого интервала циклограммы $[0, t_{1u}]$ в качестве участка характеристики циклограммы $T_\Sigma(t)$ принимается соответствующей по времени участок экспериментальной характеристики $T_1(t)$. В этом случае прогнозируемая характеристика

всегда совпадает с эталонной, т.е. теоретическая погрешность отсутствует. На практике погрешность может присутствовать и определяется величиной разброса экспериментальных данных.

Второй участок циклограммы на интервале $[t_{1у}, t_{2у}]$ представляет собой параллельный перенос вдоль оси абсцисс участка экспериментальной характеристики $T_2(t)$. Критерием выбора начала участка характеристики $T_2(t)$, т.е. момента времени $t'_{1у}$ является равенство ординаты характеристики $T_{\Sigma}(t)$ и $T_2(t)$. Вторая граничная точка $t'_{2у}$ на характеристике $T_2(t)$ получается по критерию равенства длин отрезков $[t_{1у}, t_{2у}]$ и $[t'_{1у}, t'_{2у}]$.

Все последующие участки прогнозируемой характеристики $T_{\Sigma}(t)$ получают по принципу построения второго участка. Погрешность прогнозирования тепловых характеристик для данного типа циклограмм минимальна и сопоставима с погрешностью натурных экспериментов.

Второй тип циклограмм. Схема формирования температурной характеристики для циклограммы второго типа приведена на рисунке 4.3.

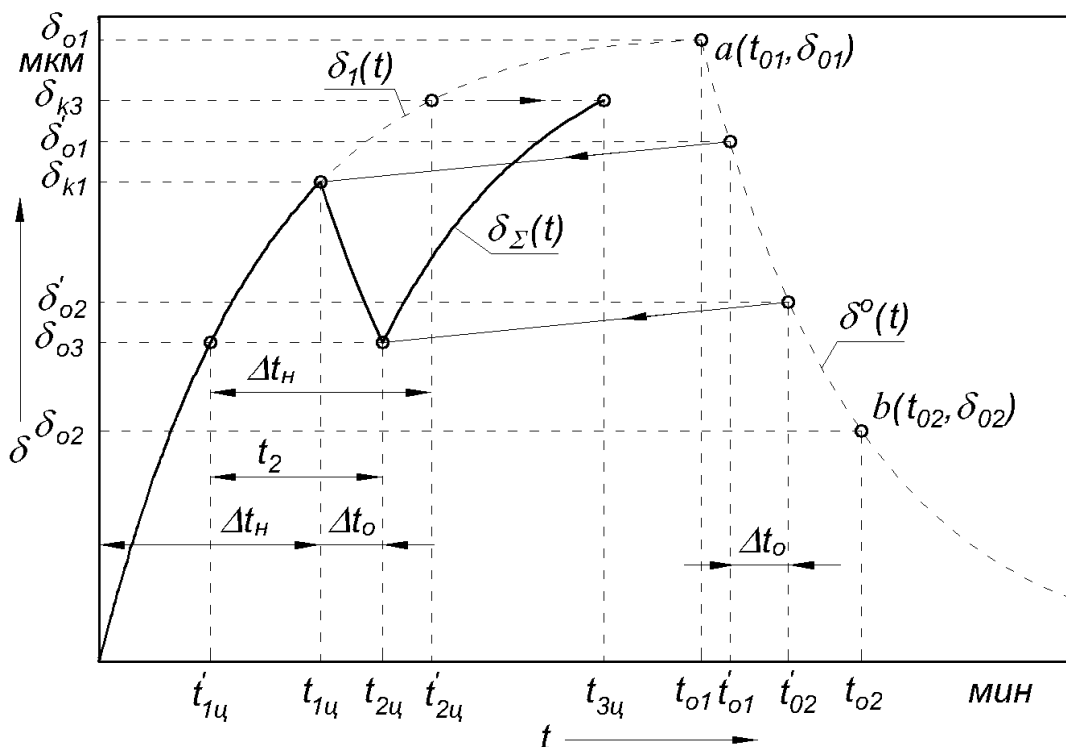


Рисунок 4.3 – Схема формирования ХТП для циклограммы второго типа

Схема формирования характеристик для циклограмм второго и первого типа на первом участке аналогичны. На втором участке циклограммы реализуется остывание станка. В этом случае в качестве копируемой характеристики выступает характеристика остывания станка, достигшего стационарного состояния при работе на соответствующем режиме (в частности, частоте вращения шпинделя). Особенностью построения этого участка прогнозируемой характеристики является выбор положения копируемого участка на кривой остывания. Если для циклограммы первого типа начало копируемого участка тепловой характеристики выбирается, исходя из равенства ординаты копируемого участка характеристики и текущей ординаты прогнозируемой характеристики, то для циклограмм этого типа такой выбор копируемого участка приводит к существенному занижению уровня прогнозируемой характеристики.

Для выбора копируемого участка на кривой остывания проводился анализ экспериментальных тепловых характеристик, полученных при остывании станка. В качестве примера на рисунках 4.4 и 4.5 представлены соответствующие тепловые характеристики.

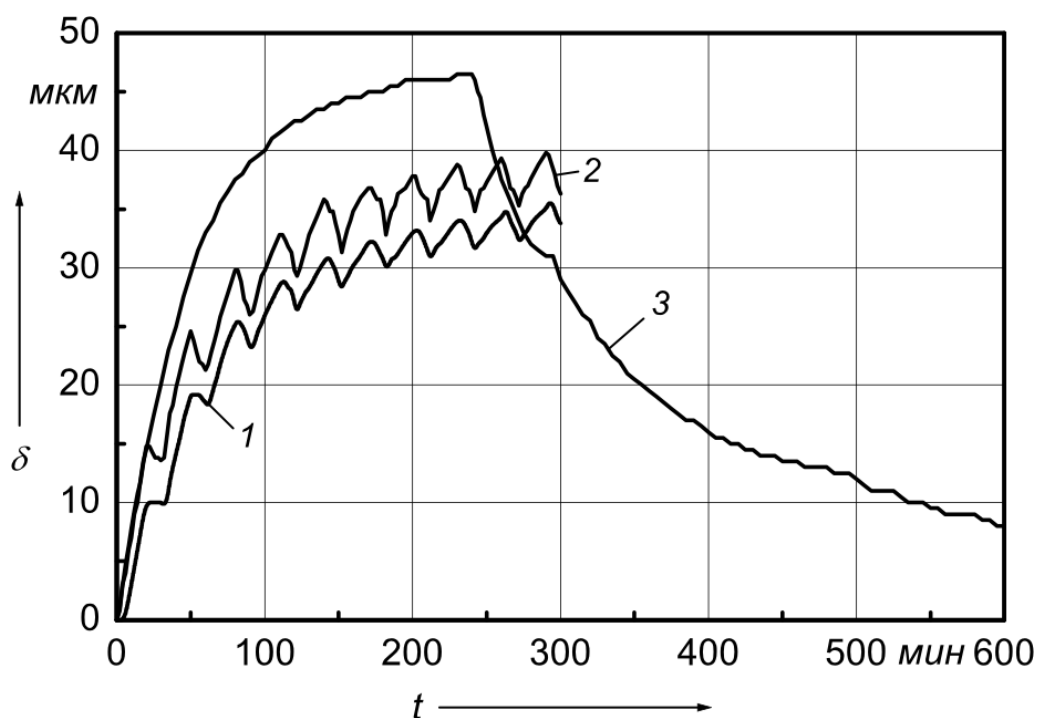


Рисунок 4.4 – ХТП для двух режимов работы станка

На рисунке 4.4 представлены характеристики температурных перемещений: две реализации для повторно–кратковременного режима работы станка, работающего по схеме: 20 минут на частоте 2000 об/мин и 10 минут отключение – кривые 1 и 2; для непрерывного режима работы на той же частоте в течение четырех часов, а в течение последующих шести часов происходило остывание (кривые 3).

На рисунке 4.5 представлены соответствующие температурные характеристики: для двух датчиков №2 (кривая 1) и №6 (кривая 2) одной реализации повторно–кратковременного режима работы станка на 2000 об/мин (период: 20 минут нагревание и 10 минут остывание); кривые 3 и 4 для датчиков 2 и 6, соответственно, представляют режим нагревание – остывание.

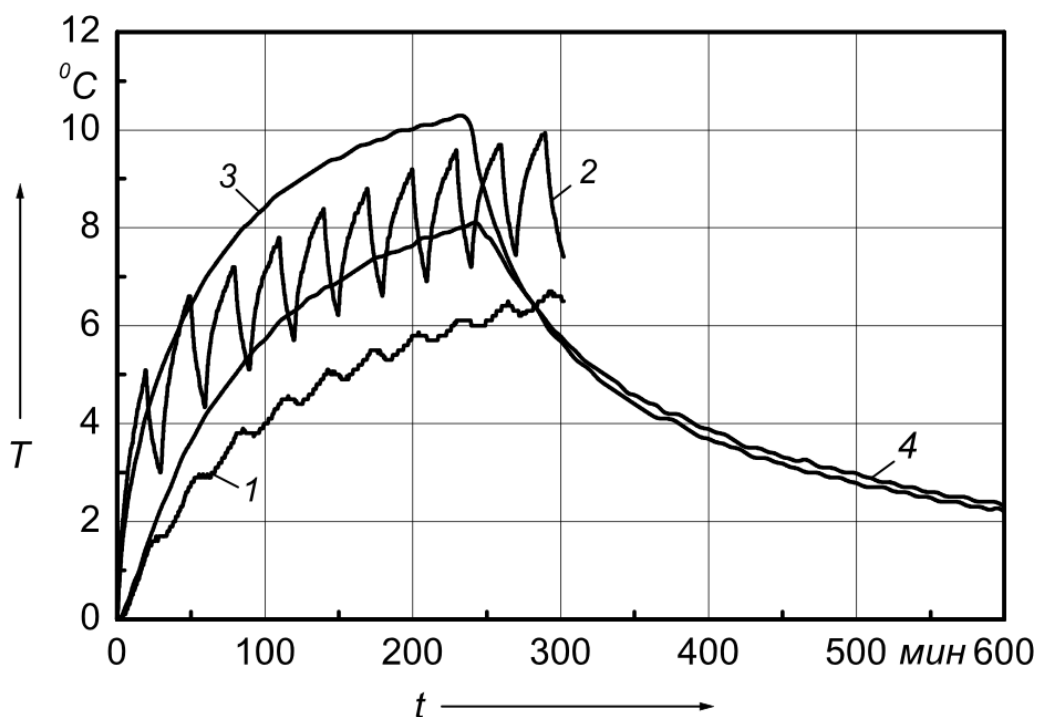


Рисунок 4.5 – ТХ для двух режимов работы станка (температура избыточная)

Сравнение участков остывания на кривых 1, 2 и на соответствующих кривых 3 показывает:

– при одинаковом уровне температур или температурных перемещений интенсивность остывания различна для повторно – кратковременного и непрерывного режимов работы станка; в основном, при повторно– кратковременном режиме работы для стадии регулярного режима нагревания [32] она выше; однако, например, для

кривой 1 (рисунок 4.4 и рисунок 4.5) первый участок охлаждения фиксирует меньшую интенсивность охлаждения, чем для кривой 3;

- интенсивность остывания на первом участке для повторно-кратковременного режима работы станка меньше, чем на последующих; с приближением стадии стационарного состояния [32] интенсивность остывания практически не меняется от участка к участку;

- для температур интенсивность остывания в разных точках НСС различна по величине.

Несмотря на большую экспериментальную базу тепловых характеристик, полученную из натурного эксперимента, как иллюстрируют приведенные выше рисунки 4.4 и 4.5, однозначных закономерностей выявить не удастся. В первую очередь, это связано с наличием случайных факторов и погрешностями измерений. Поэтому, для исключения этих негативных явлений была проведена серия вычислительных экспериментов по ранее разработанным компьютерным моделям в системе Ansys (глава 3).

Первая серия экспериментов представляла собой термдеформационный расчет НСС для различных вариантов повторно – кратковременных режимов работы станка с различным периодом повторяемости включения и различными уровнями тепловой нагрузки.

Целью этой серии экспериментов – оценить интенсивность остывания при различных уровнях нагрева НСС, в зависимости от степени удаленности стадии стационарного состояния. На рисунке 4.6 приведены фрагменты температурных характеристик для одного повторно – кратковременного режима работы. В данном случае все участки остывания НСС приведены к одной ординате, реализуя вариант: остывание от различных уровней нагрева.

Все кривые проиндексированы 1 – 10. Индекс кривой соответствует номеру участка остывания соответствующей характеристики для повторно- кратковременного режима. Из рисунка видно, что кривая 1 характеризуется наименьшей интенсивностью, а кривая 10 – максимальной.

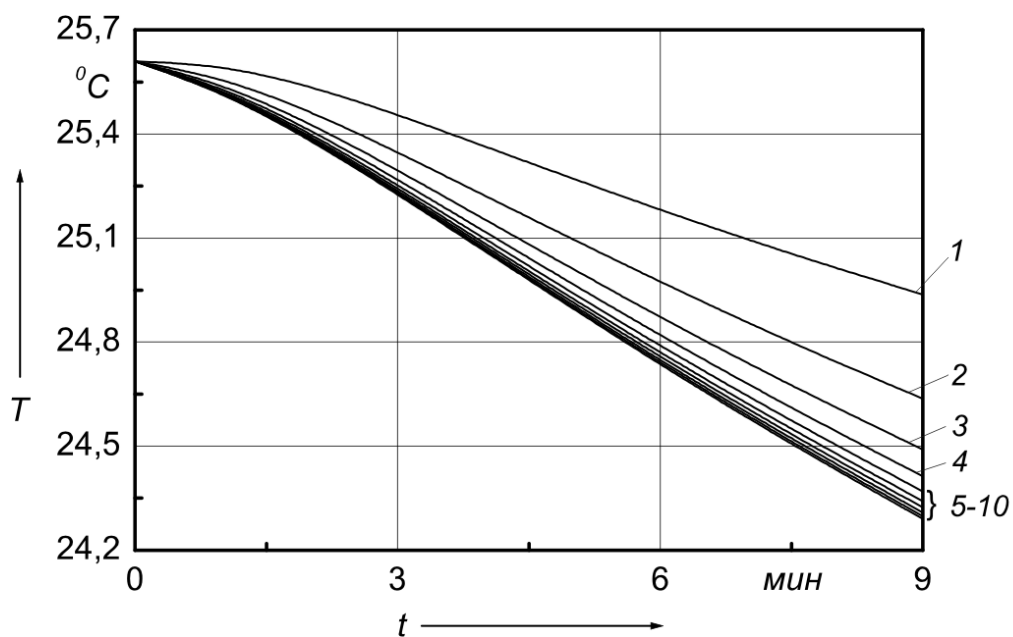


Рисунок 4.6 – Фрагменты ТХ для повторно – кратковременного режима работы (остывание от различных уровней)

Вторая серия экспериментов представляла собой термдеформационный расчет НСС для режима «нагревание – остывание». Результаты одного из наиболее показательных экспериментов приведены на рисунке 4.7.

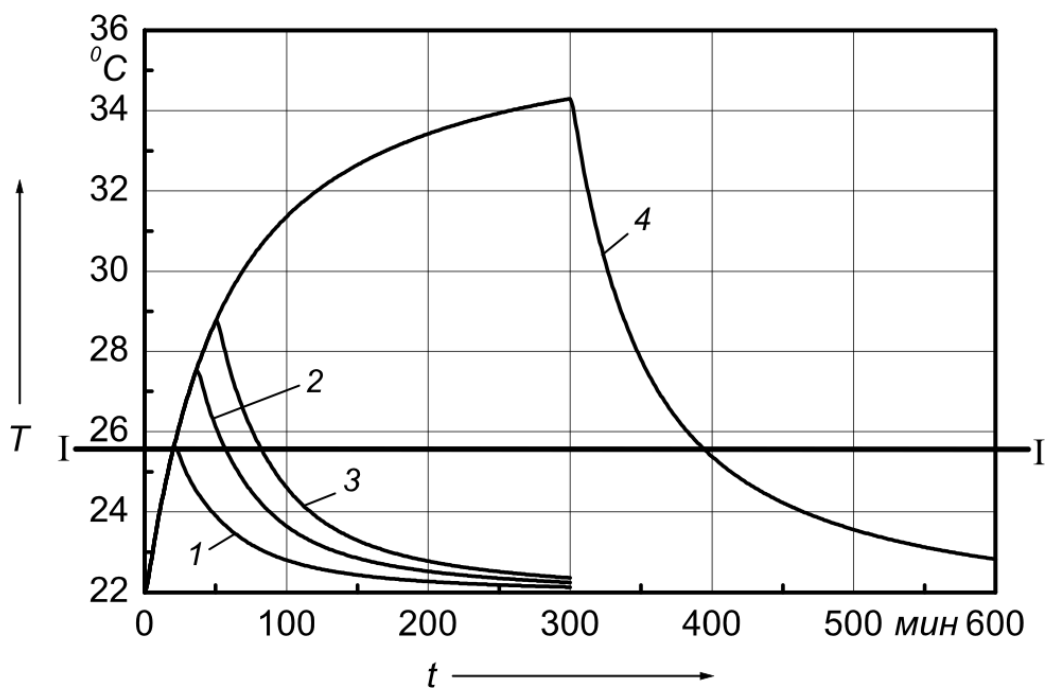


Рисунок 4.7 – Результаты вычислительного эксперимента для четырех вариантов расчета «нагревание – остывание»

Эксперимент включал четыре термдеформационных расчета модели НСС и был проведен по следующей схеме: 20 минут нагревание станка при фиксированном уровне тепловой нагрузки и остывание в течение 265 минут, т.е. реализация режима естественной конвекции при отключенных тепловых источниках; нагревание в течение 35 минут и остывание в течение 265 минут; нагревание – 50 минут и остывание – 250 минут (кривая 3); нагревание – 300 минут и остывание – 300 минут (кривая 4).

Для наглядности демонстрации кривизны различных температурных характеристик на стадии остывания были рассмотрены фрагменты характеристик 1 – 4, отсеченные уровнем I – I, и приведенные к одной ординате (рисунок 4.8).

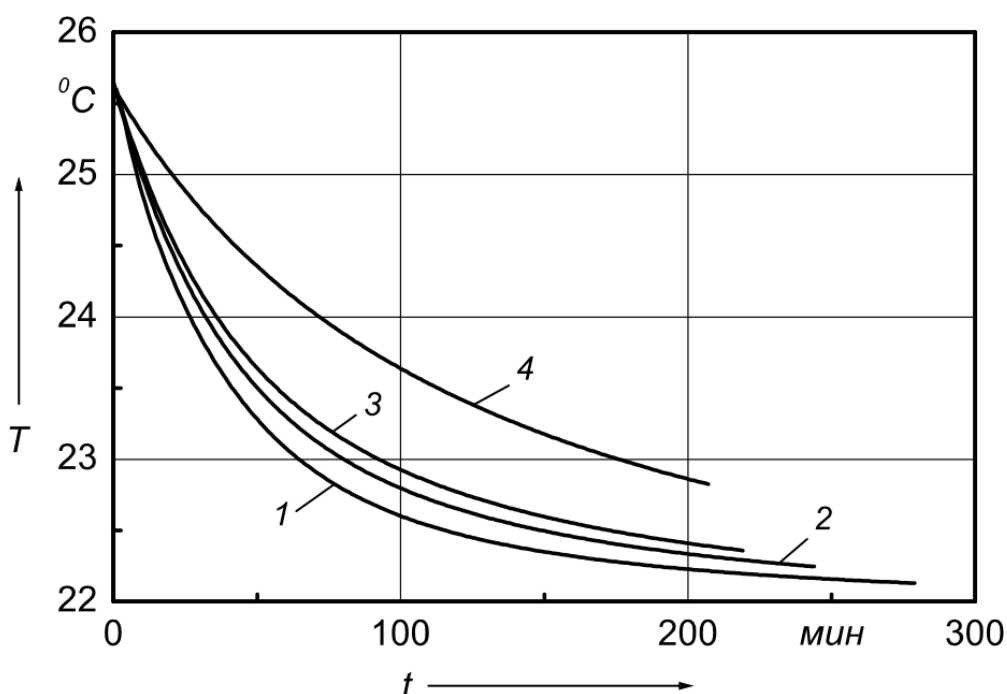


Рисунок 4.8 – Фрагменты ТХ для четырех вариантов расчета «нагревание – остывание» (остывание от единого уровня I – I)

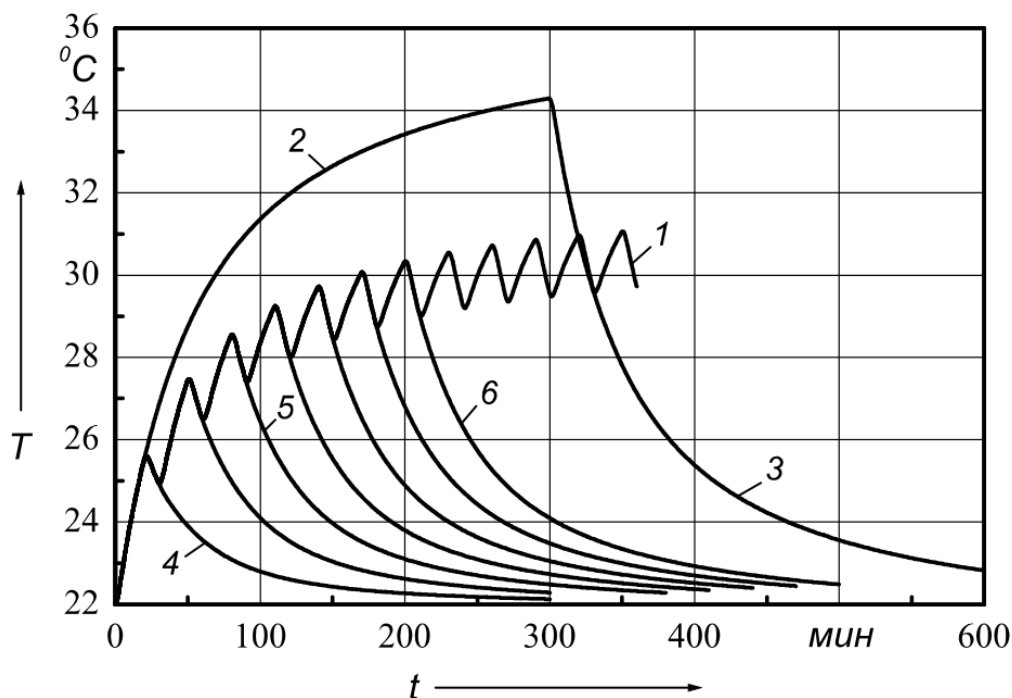
Анализ фрагментов температурных характеристик показал:

- процесс остывания станка, независимо от начального уровня температуры охлаждения, в начальный момент времени всегда характеризуется меньшей интенсивностью;
- при равенстве ординат тепловых характеристик, полученных при различных уровнях начальной температуры остывания, кривизна участков сравниваемых ха-

рактик будет различной;

– чем ближе станок к стадии стационарного состояния, тем интенсивность остывания выше.

Третья серия экспериментов представляла собой термдеформационный расчет НСС для повторно – кратковременного режима в сочетании с процессом – остывание. Температурные характеристики приведены на рисунке 4.9.



1 – повторно–кратковременный режим; 2 – режим непрерывного нагрева; 3 – режим непрерывного охлаждения; 4, 5 и 6 – кривые охлаждения, полученные для повторно–кратковременных режимов разной цикличности (1, 3 и 7 циклов, соответственно)

Рисунок 4.9 – ТХ для одного варианта третьей серии вычислительных экспериментов

Структура проведенной серии экспериментов была следующей:

– термдеформационный расчет НСС для трех вариантов повторно – кратковременных режимов с периодом 15 минут (10 минут нагрева и 5 минут остывания), 30 минут (20 и 10 минут, соответственно) и 45 минут (30 и 15 минут, соответственно), соответственно;

– один вариант расчета нагревание – остывание: 300 минут нагревание и 300 минут охлаждение;

– расчеты на остывание на каждой стадии остывания в повторно – кратковременном режиме.

На рисунке 4.9 из всей серии проведенных экспериментов представлены результаты экспериментов для одного варианта повторно –кратковременного режима с периодом 30 минут (20 минут нагревания и 10 минут остывания).

Целью проведенных экспериментов – создание правила выбора копируемого участка кривой остывания 3 для кривых охлаждения, полученных для повторно–кратковременных режимов разной цикличности.

Для достижения поставленной цели были выполнены дополнительные графические построения (рисунок 4.10):

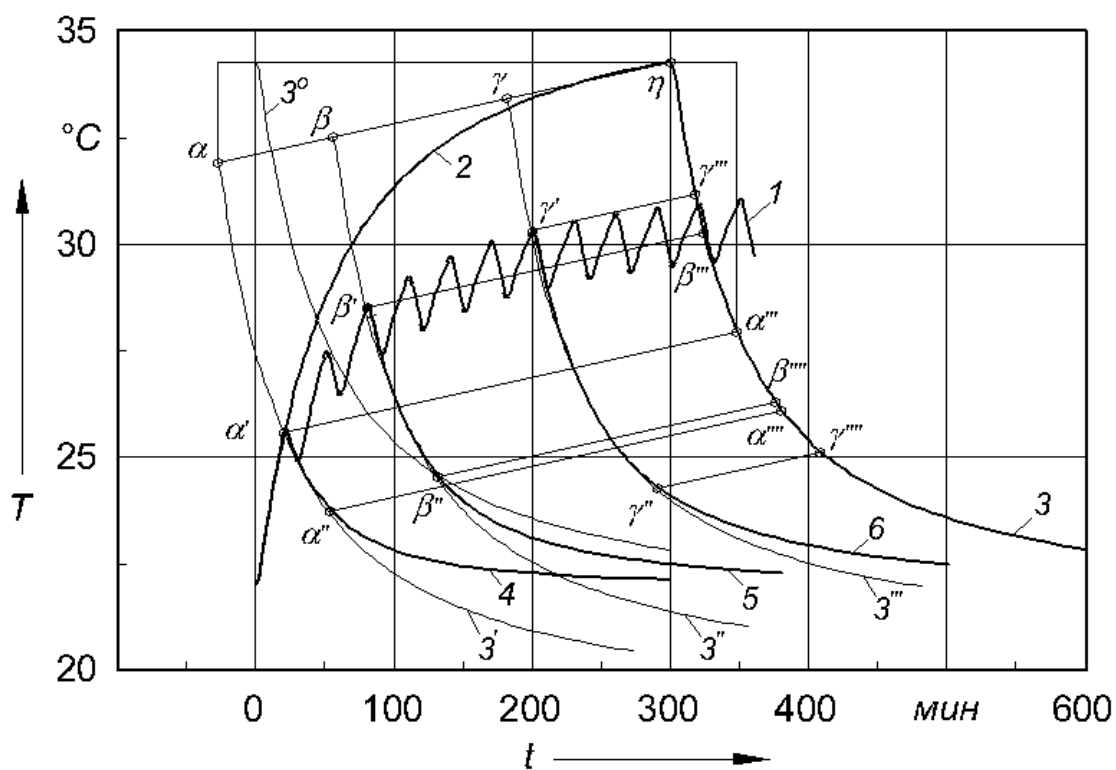


Рисунок 4.10 – ТХ для одного варианта третьей серии вычислительных экспериментов с дополнительными построениями

– кривая 3^0 – копия кривой охлаждения 3 с параллельным переносом $T^0(t-300)$;

– три копии кривой охлаждения 3 с параллельным переносом и дополнитель-

ным смещением по ординате для повторно–кратковременных режимов трех вариантов цикличности по критерию минимального расхождения ординат копий кривой охлаждения (кривые $3'$, $3''$ и $3'''$) с соответствующими кривыми охлаждения 4, 5 и 6 на участке максимальной длины: (α', α'') , (β', β'') и (γ', γ'') .

Построения всех кривых по результатам моделирования в системе Ansys выполнялись с использованием автоматизированной системы анализа и визуализации данных OriginPro. Автоматически полученные граничные точки кривых $3'$, $3''$, $3'''$ и $3 - \alpha$, β , γ и η оказались лежащими на одной прямой.

Этот результат позволяет однозначно определять положение границ копируемого участка характеристики остывания и тем самым строить соответствующий участок прогнозируемой характеристики на интервале $[t_{1y}, t_{2y}]$ (рисунок 4.3). Например, для первого периода остывания повторно –кратковременного режима работы участок прогнозируемой кривой представляет собой копию характеристики 3 с начальной точкой α''' . Ордината точки α''' представляет собой пересечение параллельной прямой $[\alpha', \alpha'']$ с кривой 3. Абсцисса α''' представляет собой решение обратной функции, описывающей характеристику $T^0(t)$ (кривая 3). Положение второй граничной точки на прогнозируемой характеристике определяется длительностью остывания и не вызывает затруднений. Все остальные участки остывания прогнозируемой характеристики строятся аналогично. Для подтверждения однотипности рассуждений выделены пары соответствующих участков кривых: $(\beta', \beta'') - (\beta''', \beta''')$ и $(\gamma', \gamma'') - (\gamma''', \gamma''')$.

Из проведенных экспериментов было установлено, что чем ближе наступление режима стационарного состояния станка при нагревании, тем на большем временном интервале наблюдается согласование копий кривой охлаждения (кривые $3'$, $3''$ и $3'''$) с соответствующими кривыми охлаждения для повторно–кратковременных режимов разной цикличности (в данном случае, кривые 4, 5 и 6, рисунок 4.10).

Третий тип циклограмм. Схема формирования температурной характеристики для циклограммы этого типа приведена на рисунке 4.11.

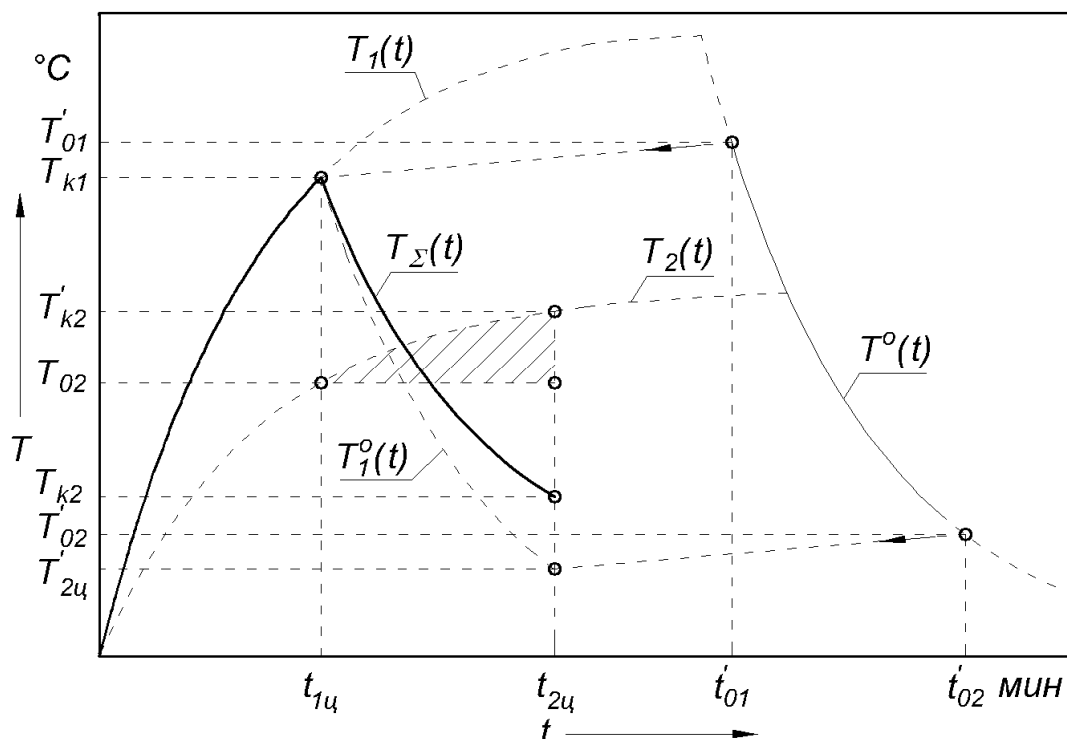


Рисунок 4.11 – Схема формирования прогнозируемых ТХ

Схема формирования характеристик для всех типов циклограмм на первом участке идентичны. На втором участке циклограммы реализуется состояние станка, представляющее собой суперпозицию двух процессов: остывание, вызываемое отключением теплового источника (кривая $T_1^0(t)$), и нагревание, обусловленное включением теплового источника меньшей мощности (кривая $T_2(t)$). Кривая $T_1^0(t)$ представляет собой копию характеристики $T^0(t)$, а ее положение определяется также как для циклограммы второго типа на участке остывания. Ордината прогнозируемой характеристики на втором участке графически представляет собой сумму ординат кривой $T_1^0(t)$ и соответствующей ординаты характеристики $T_2(t)$ для заштрихованной области с началом координат в точке T_{02} (это означает, что ордината на характеристике $T_2(t)$ для заштрихованной области в точке T_{02} равна нулю). Для последующих участков прогнозируемой характеристики схема построения – идентичная, только для построения прогнозируемой характеристики используются другие характеристики охлаждения вместо $T^0(t)$ (для соответствующей частоты вращения) и ха-

рактики нагрева вместо $T_2(t)$.

На основе предложенных математических моделей и схем формирования тепловых характеристик были разработаны алгоритмы и программное средство в системе Matlab, оснащенное графическим пользовательским интерфейсом.

4.3 Автоматизированное построение прогнозируемых тепловых характеристик

При формулировании основополагающей гипотезы разрабатываемого метода в качестве инструментария использовались система анализа и визуализации данных OriginPro и графические системы CorelDraw, КОМПАС – График и AutoCad. На первом этапе система OriginPro использовалась для построения базовых графиков экспериментальных тепловых характеристик, а затем в графических системах строились прогнозируемые характеристики из отдельных фрагментов базовых характеристик на основе только визуального оценивания. Для проведения масштабных вычислительных экспериментов был разработан обобщенный алгоритм реализации автоматизированного построения прогнозируемых тепловых характеристик (рисунок 4.12). Главное окно программного средства приведено на рисунке 4.13.

Алгоритм включает четыре основных блока: блок данных, блок идентификации типа циклограммы; расчетный блок; блок результатов.

Блок данных включает три типа: базовые тепловые характеристики, циклограммы и дополнительные данные.

Базовые тепловые характеристики представляют собой таблицу экспериментальных данных, оформленную в виде текстового файла. Фрагменты файлов данных приведены на рисунках 4.14 и 4.15, здесь дополнительно введена первая строка для удобства описания. Файл представляет собой таблицу данных, состоящую только из чисел:

– для температурных характеристик число столбцов равно числу термодатчиков плюс столбец времени;

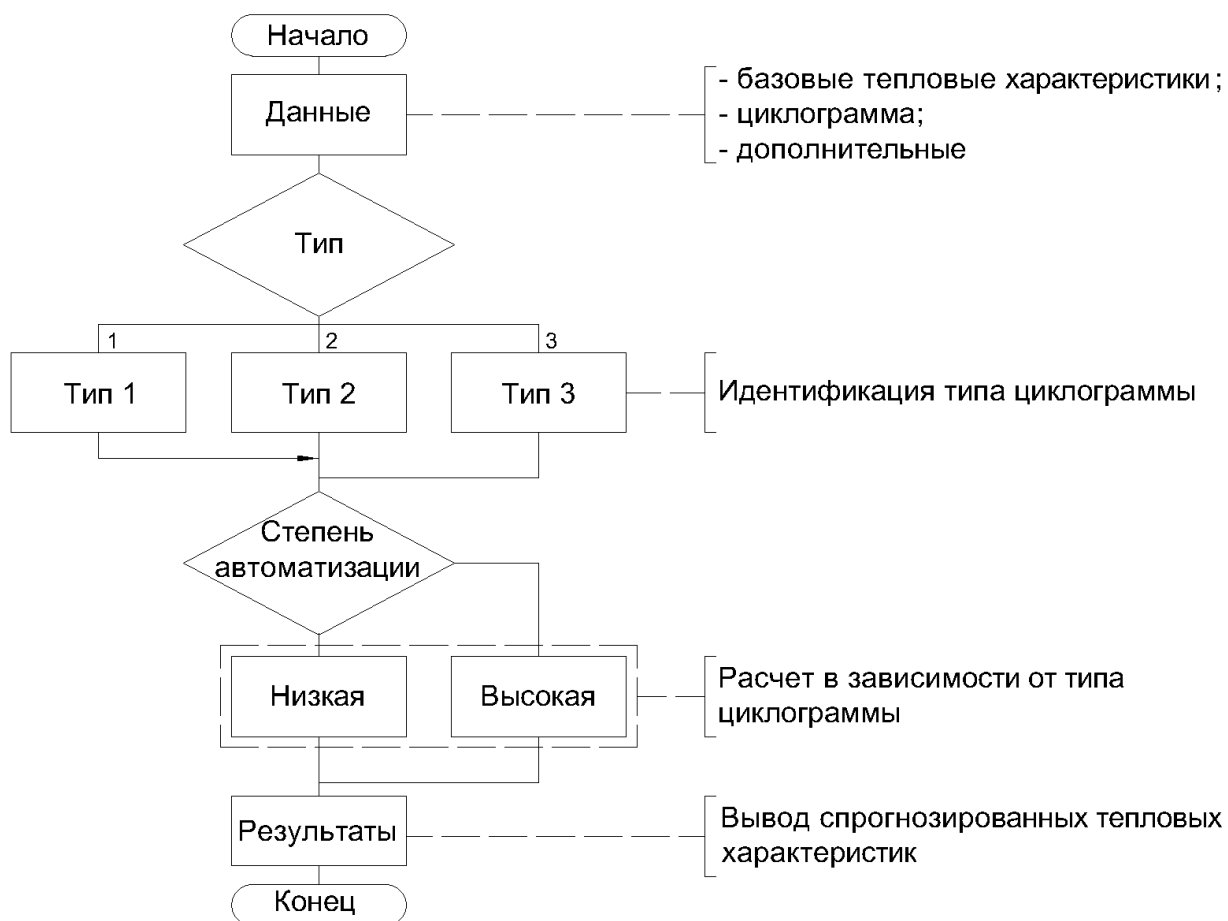


Рисунок 4.12 – Схема алгоритма автоматизированного построения прогнозируемых тепловых характеристик

– для характеристик температурных перемещений число столбцов равно числу измеряемых координатных перемещений плюс столбец времени.

Столбец времени во всех файлах всегда первый. В файле температурных характеристик время задано в формате: «часы : минуты : секунды» (рисунок 4.14). В файле характеристик температурных перемещений формат времени представляется в десятичной системе исчисления (рисунок 4.15).

Для первого типа циклограмм прогнозируемые тепловые характеристики базируются на тепловых характеристиках нагрева НСС. В циклограммах второго и третьего типов они базируются как на характеристиках нагрева, так и остывания. Выбор базовых характеристик нагрева выполняется из списка файлов, заданных в программном средстве с использованием элемента управления – раскрывающийся список (рисунок 4.16а). Аналогично осуществляется выбор базовых характеристик

остывания – рисунок 4.16б. Все существующие файлы данных базовых тепловых характеристиках представлены в верхних окнах выделенных фрагментов скриншота программного средства – рисунок 4.16. Соответственно, в нижних окнах появляется список выделенных файлов.



Рисунок 4.13 – Скриншот главного окна программного средства

Кроме базовых тепловых характеристик для реализации метода прогнозирования необходимы циклограммы. Формат циклограммы задается списком данных, представленных на рисунке 4.17а. После первичного ввода циклограммы предусмотрена возможность как сохранения данных в виде текстового файла, так и ее визуализация. Ввод имени сохраняемого файла осуществляется в текстовой строке, ниже следующей за списком данных. В нижнем правом сегменте главного окна программы происходит вывод графического представления циклограммы (рисунок 4.13).

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0:00:00	22	22	22	22	22	22	22	22
0:01:00	22.0084	22.006	23.9763	22.0077	22.0042	22	22	21.9994
0:02:00	22.0224	22.0169	25.0993	22.0228	22.0121	22	22	21.9988
0:03:00	22.0389	22.0307	25.9441	22.0424	22.0226	22	21.9999	21.9992
0:04:00	22.0562	22.046	26.6099	22.064	22.0347	22	21.9998	22.0017
0:05:00	22.0737	22.062	27.1492	22.0863	22.0478	22	21.9996	22.0069
0:06:00	22.091	22.0782	27.5963	22.1083	22.0615	22.0001	21.9994	22.0151
0:07:00	22.108	22.0943	27.9744	22.1298	22.0756	22.0001	21.9994	22.0266
0:08:00	22.1247	22.1103	28.2999	22.1507	22.0898	22.0002	21.9995	22.041
0:09:00	22.1411	22.1262	28.5844	22.1707	22.1041	22.0004	22	22.0582
0:10:00	22.1572	22.1418	28.8362	22.1901	22.1183	22.0006	22.0009	22.0779

Рисунок 4.14 – Фрагмент файла базовых ТХ

0	0	0	0
1	0.03	-1.206	22.762
2	0.017	-0.016	22.246
3	0.008	1.119	21.758
4	0	2.2	21.297
5	-0.005	3.229	20.863
6	-0.009	4.211	20.453
7	-0.01	5.148	20.064
8	-0.011	6.045	19.695
9	-0.009	6.904	19.345
10	-0.007	7.728	19.013

Рисунок 4.15 – Фрагмент файла базовых ХТП

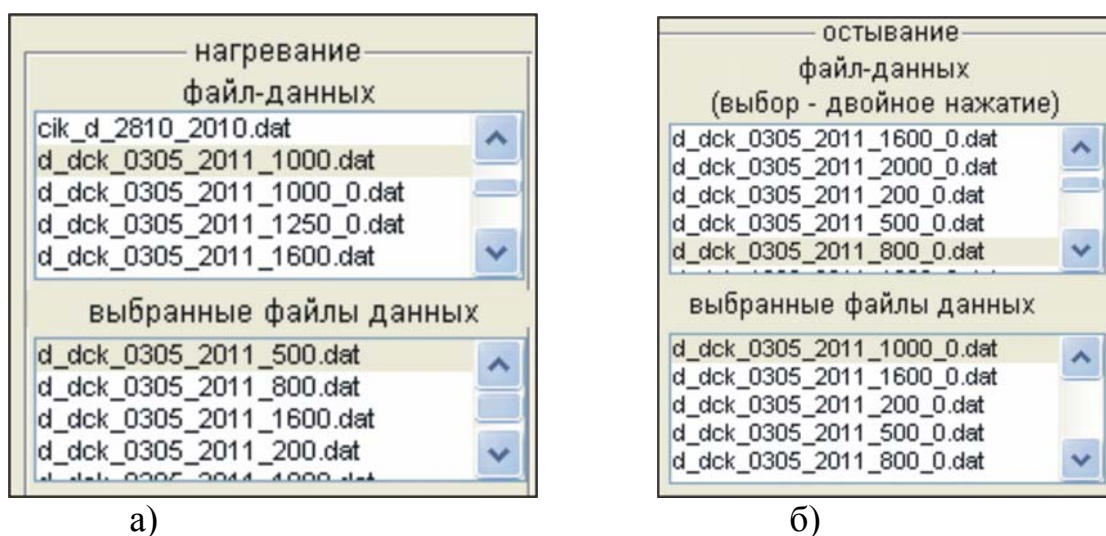


Рисунок 4.16 – Фрагменты выбора данных базовых тепловых характеристик

Для выбора новой циклограммы работы станка из раскрывающегося списка (рисунок 4.17б) выбирается имя файла - данных циклограммы.

Для тестирования разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик были созданы файлы – данных тепловых характеристик, описывающих термомодеформационное состояние НСС в условиях различных циклограмм работы станка. Загрузка имени файла - данных таких характеристик осуществляется выбором соответствующего имени файла из раскрывающегося списка. В нижеследующей строке высвечивается имя выбранного файла (рисунок 4.17в).

циклограмма

1	0	30	1000
2	30	90	800
3	90	150	1600
4	150	190	500
5	190	220	1000
6	220	280	1600
7	280	300	200
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
	t1	t2	n

а)

pol_0105_m.cik
pol_0205_m.cik
pol_03052011.cik
pol_0305_n.cik

б)

файлы-данных контроля
по циклограмме

cik_d_0105_2011.DAT
cik_d_01_05_2011.DAT
cik_d_02_05_2011.dat
cik_d_0405_2010_1600.dat
cik_d_0405_2011_1600.dat
cik_d_07_05_2011.dat
cik_d_08_05_2011.dat

выбранный файл-данных

cik_d_07_05_2011.dat

Введите имя-файла

в)

Рисунок 4.17 – Фрагменты задания циклограммы, выбора файла данных и файла – данных тестовых тепловых характеристик

В программе предусмотрена возможность задания файла-данных базовых характеристик в виде единого файла-данных, включающего первую стадию нагревания, а вторую стадию – остывания. Для разграничения этих стадий теплового процесса в программе предусмотрена возможность задания границ нагревания и остывания (рисунок 4.18). При этом, как при формировании циклограмм, всегда первоначально формирование файла-данных с использованием списка данных по формату, приведенному на риске (4.18а). При повторном использовании данной циклограммы следует использовать список известных файлов из раскрывающегося списка (рисунок 4.18б).

нагрев.-остыв.		
грм	нагр.	остыв.
200	300	301
500	300	301
800	300	301
1000	300	301
1600	300	301
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0

а)

файлы-данных (аппроксимация)	
pol_n_o_1.dat pol_n_o_3010_10.dat pol_n_o_dub.dat pol_n_o_dubl.dat	^ v
сохранить файл	
pol n o 1.dat	OK!

б)

Рисунок 4.18 – Фрагменты задания структуры данных о базовых тепловых характеристиках «нагревание – остывание» и выбора соответствующего файла данных

Базовые тепловые характеристики при построении прогнозируемых тепловых характеристик используются в виде аппроксимированных кривых. При этом в качестве аппроксимирующих функций используются полиномы или экспоненциальные функции. При использовании полиномов необходимо задание степени. Это осуществляется с использованием дополнительных данных. Степень может быть задана одна для тепловых характеристик на всей циклограмме (рисунок 4.19), а может быть задана для каждого отдельного участка циклограммы (рисунок 4.20).

степень полинома	6	уровень	11
перемещение (X-1, Y-2, Z-3)	2	номер датчика	6
точка остывания 1	150	точка остывания 2	45

Рисунок 4.19 – Область дополнительных данных

В качестве дополнительных данных используются:

- максимальный уровень температур и или температурных перемещений (ориентировочный, т.к. точность не имеет значение) – строка «уровень»;
- номер термодатчика – строка «номер датчика»;
- номер координатного перемещения – строка «перемещение»;
- точки « α ''' и « γ ''' на кривой остывания, определяющие участки остывания прогнозируемых характеристик – строки «точка остывания 1» и «точка остывания 2» (рисунок 4.10).

— данные —

характеристика
аппроксимации

1	0	60	6
2	60	120	6
3	120	180	6
4	180	300	6
5	0	0	0
	t1	t2	степень

(аппроксимация)

pol_n_o_1.dat
 pol_n_o_3010_10.dat
 pol_n_o_dub.dat
 pol_n_o_dubl.dat

сохранить файл

Рисунок 4.20 – Фрагменты задания данных о степени аппроксимирующего полинома на различных участках циклограммы и выбора соответствующего файла данных

Радиокнопки «температура» и «перемещения» в главном окне программы определяют как используемые алгоритмы чтения файлов данных, так и алгоритмы их обработки. Радиокнопки «экстраполяция» и «нормировка» используются в расчетном блоке.

Блок идентификации типа циклограммы в схеме алгоритма автоматизированного построения прогнозируемых тепловых характеристик определяет исполь-

зуемые алгоритмы построения прогнозируемых тепловых характеристик (рисунки 4.2, 4.3 и 4.11). Этот блок в интерфейсе программы не представлен, т.к. реализован внутри расчетного блока.

Расчетный блок включает (рисунок 4.21):

- формирование прогнозируемых тепловых характеристик для трех типов циклограмм;
- формирование прогнозируемых тепловых характеристик для четвертого обобщенного типа циклограмм, представляющего собой комбинацию трех типов циклограмм;
- процедура экстраполяции тепловых характеристик, основанная на экспериментальном модальном анализе.



Рисунок 4.21 – Элементы управления в главном рабочем окне программы, реализующие расчетный блок

В зависимости от состояния радиокнопок «температура/перемещение» осуществляется формирование ТХ или ХТП.

Формирование тепловых характеристик для первого типа циклограмм реализуется последовательным запуском расчетов, связанным с кнопками: «нагревание», «графики-норм», «прогноз-рост».

Формирование тепловых характеристик для второго типа циклограмм реализуется запуском расчета, связанного с кнопкой: «регулярный».

Формирование тепловых характеристик для третьего типа циклограмм реали-

зуется последовательным запуском расчетов, связанным с кнопками: «нагревание», «графики-норм», «остывание», «графики-норм» (правый столбец кнопок) «прогноз-понижение».

Формирование тепловых характеристик обобщенного типа циклограмм реализуется запуском расчета, связанного с кнопкой: «прогноз-общий».

Блок результатов позволяет: визуально представить спрогнозированные тепловые характеристики, а также для тестовых вариантов оценить погрешность прогнозирования; сформировать текстовый файл спрогнозированных тепловых характеристик.

После расчета для каждого типа циклограммы текстовый файл спрогнозированных тепловых характеристик формируется автоматически.

Визуальное представление спрогнозированных тепловых характеристик выполняется автоматически после завершения расчета. Визуальное представление погрешности прогнозирования, путем построения экспериментальных и спрогнозированных тепловых характеристик по тестовой циклограмме. Визуализация результатов реализуется нажатием соответствующих кнопок «контроль-рост», «контроль-понижение», «регулярный-контроль» и «прогноз-контроль».

4.4 Реализация метода прогнозирования тепловых характеристик

Представленные выше математическое описание прогнозируемых тепловых характеристик и разработанное программное средство позволяют представить метод прогнозирования тепловых характеристик в виде блок-схемы (рисунок 4.22).

Укрупнено основные этапы метода представлены на рисунке 4.23.

Первый этап. Натурные испытания станка. Проводят серию тепловых испытаний станка в условиях непрерывного режима на холостом ходу типа: «нагревание - остывание» на фиксированной частоте вращения шпинделя. Чередование частот выполняют с экспериментально - установленным шагом (рисунок 4.23).

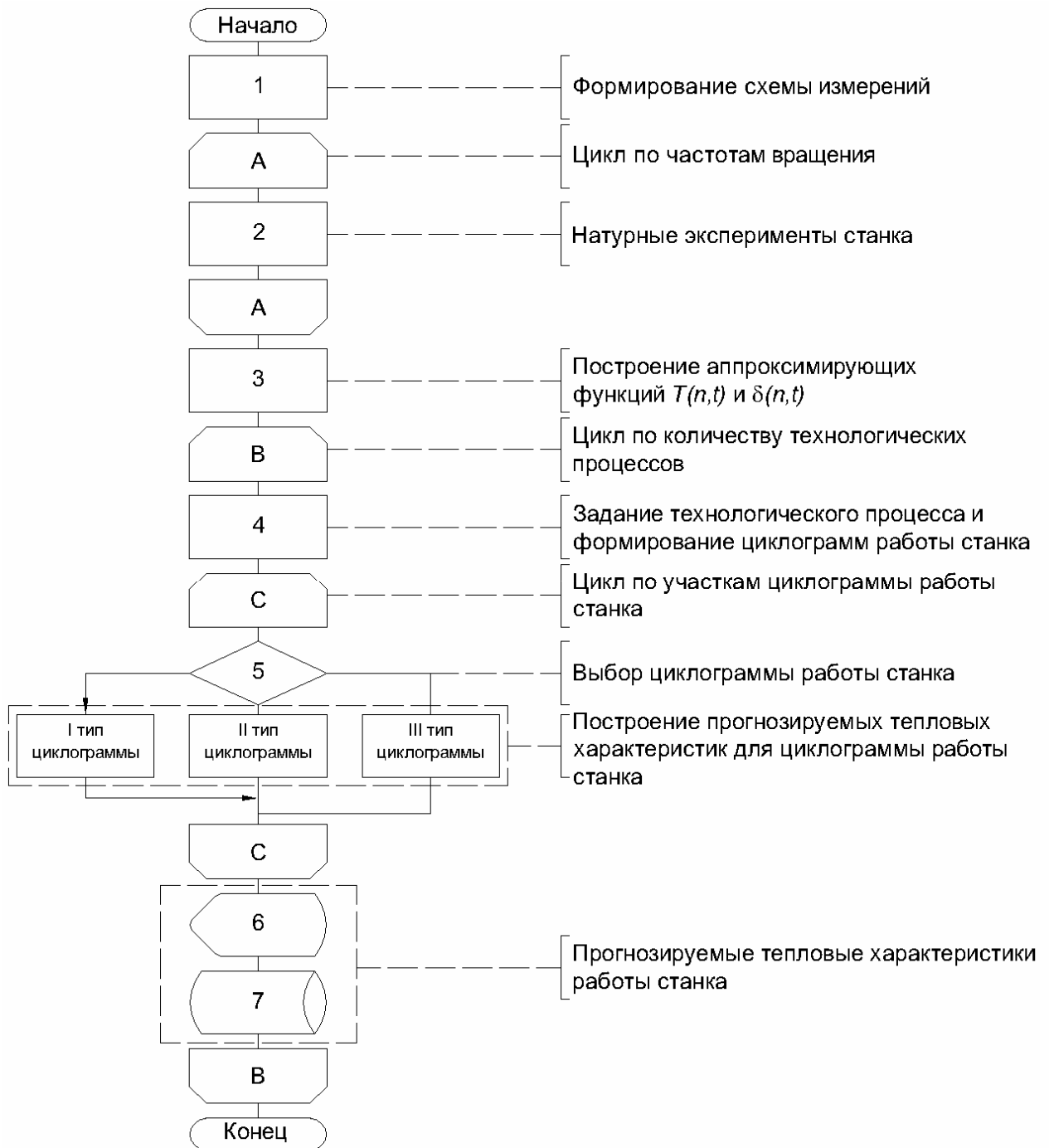


Рисунок 4.22 – Схема метода прогнозирования тепловых характеристик

На этом этапе предварительно выбирается схема измерений, включающая расположение термодатчиков и измерительных головок для измерений температурных перемещений (блок 1, рисунок 4.22). Обобщая разработанный метод на станки с ЧПУ, использующие привод с бесступенчатым регулированием, провести натурные испытания для всех частот вращения невозможно. Поэтому натурные испытания

проводятся только для некоторого набора частот вращения шпинделя. Для этого выбирается диапазон частот вращения шпинделя и шаг чередования частот (блок 2, рисунок 4.22).

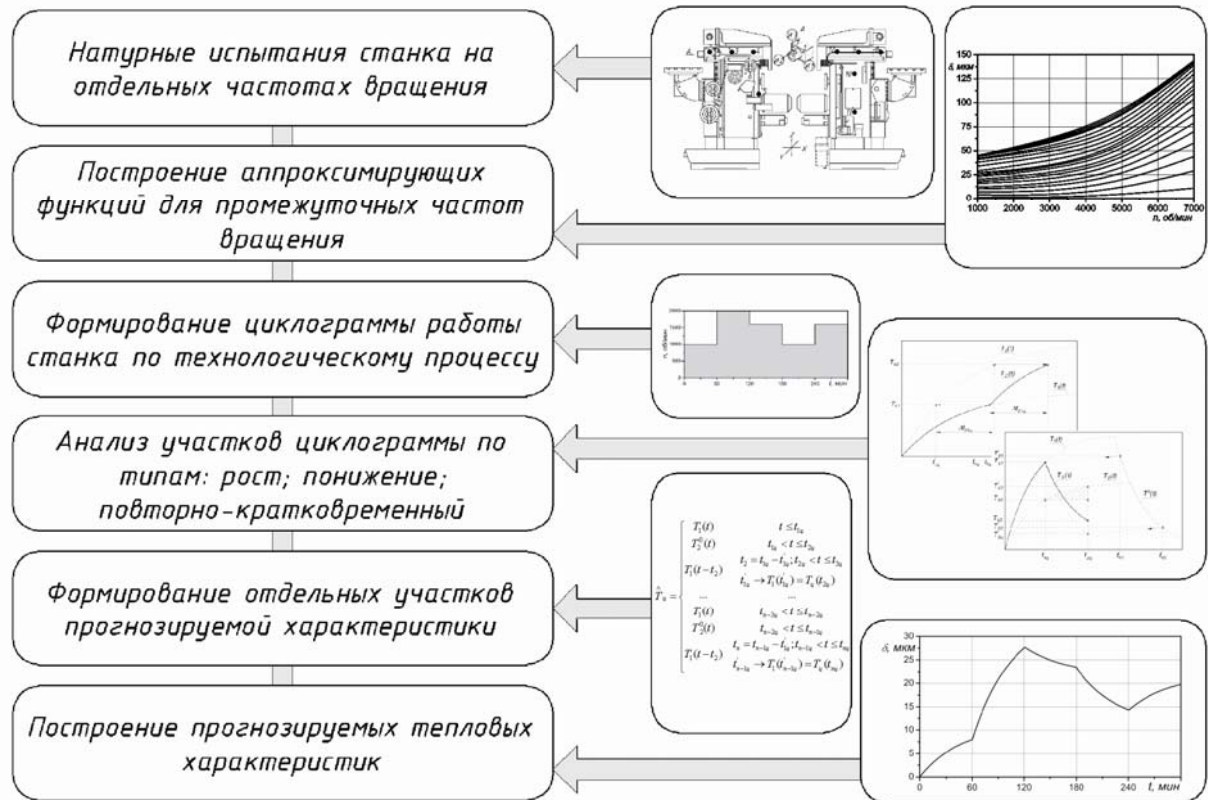


Рисунок 4.23 – Схема реализации метода прогнозирования тепловых характеристик

Второй этап. Построение аппроксимирующих функций для промежуточных частот вращения. Для построения тепловых характеристик на промежуточных частотах выполняют построение аппроксимирующих зависимостей вида $\delta(n, t)$ и $T(n, t)$ (блок 3, рисунок 4.22). Вид аппроксимирующих функций – полином.

Третий этап. Формирование циклограммы работы станка по технологическому процессу. По технологическому процессу формируют соответствующую циклограмму для станка (блок 4, рисунок 4.22). Количество циклограмм определяется номенклатурой обрабатываемых деталей.

Четвертый этап. Анализ участков циклограммы по типам. В зависимости от последовательности изменения режимов работы станка каждая циклограмма идентифицируется по типу – это определяет алгоритм использования программного средства.

Пятый этап. Формирование отдельных участков прогнозируемой характеристики. В зависимости от установленного на четвертом этапе типа циклограммы реализуются математические модели, описанные в пункте 4.2.

Шестой этап. Построение прогнозируемых тепловых характеристик. Визуальное представление с выводом на монитор и формирование текстового файла осуществляется после формирования характеристики последнего участка циклограммы.

5 Экспериментальная апробация метода прогнозирования

Для экспериментальной апробации разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик станка использованы результаты натурных и вычислительных экспериментов, описанные во второй и третьей главе, а также проведенные дополнительно. На основе полученной экспериментальной информации и разработанного программного обеспечения проведены вычислительные эксперименты, в ходе которых оценивались эффективность разработанных алгоритмов.

Если в предыдущих параграфах графическая информация представлялась только для иллюстрации работы разработанного программного обеспечения, то в данном параграфе вывод графической информации будет привязан к иллюстрации работоспособности описанных ранее вычислительных процедур.

Эффективность реализации каждой процедуры рассматривается применительно к ТХ $T(t)$ и ХТП $\delta(t)$ для фрезерно-сверлильного станка высокой точности Deckel FP3 и расчетной модели НСС разработанной в САЕ-системе Ansys.

5.1 Прогнозирование температурных характеристик

В программном средстве формирование спрогнозированных тепловых характеристик осуществляется для следующих типов циклограмм:

- первый тип – характеризуется непрерывным ростом частоты вращения при переходе на новый интервал времени;
- второй тип – повторно-кратковременный режим работы;
- третий тип – характеризуется непрерывным снижением частоты вращения при переходе на новый интервал времени;
- четвертый тип – обобщенный тип, допускающий как последующий рост частоты вращения, так и ее падение.

Были проведены серии вычислительных экспериментов для пятидесяти вариантов циклограмм. Примеры формирования прогнозируемых тепловых характери-

стик для четырех типов циклограмм представлены ниже.

5.1.1 Прогнозирование температурных характеристик для I-го типа циклограмм

В качестве исходных данных для прогнозирования ТХ используем экспериментальные и машинные ТХ для первого, второго, третьего и шестого термодатчика. На рисунке 5.1 приведено рабочее окно программного модуля с введенными исходными данными. В правой нижней области рабочего экрана приведена циклограмма переменного теплового режима работы станка.

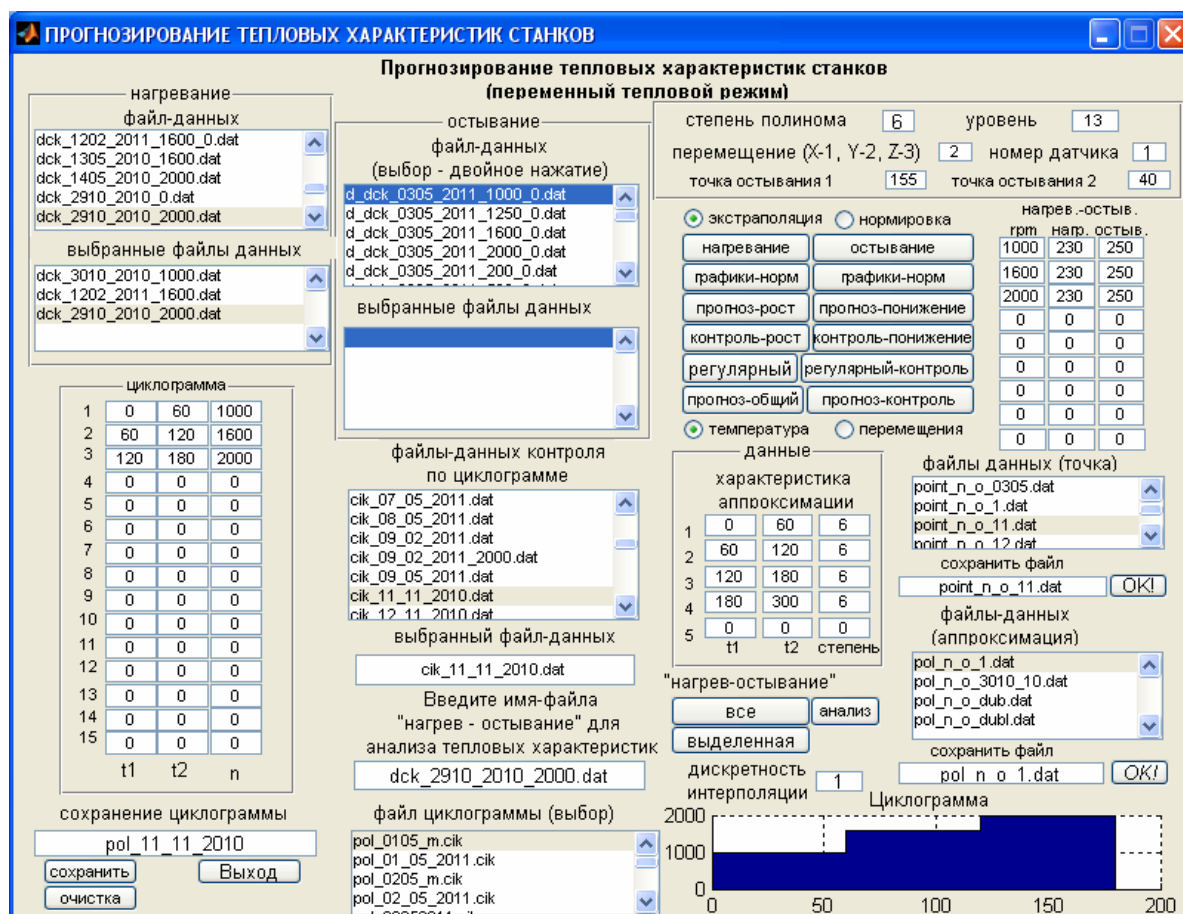


Рисунок 5.1 – Экранная форма формирования ТХ для первого типа циклограмм

Параметры циклограммы непосредственно вводятся в предусмотренные в нижней левой области рабочего окна программы поля ввода, объединенные общим заголовком «циклограмма»:

циклограмма			
	t1	t2	n
1	0	60	1000
2	60	120	1600
3	120	180	2000
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

сохранение циклограммы

pol_11_11_2010

сохранить Выход

очистка

файл циклограммы (выбор)

- pol_0105_m.cik
- pol_01_05_2011.cik
- pol_0205_m.cik
- pol_02_05_2011.cik

Рисунок 5.2 – Фрагмент рабочего окна программы с выделенной областью под ввод параметров циклограммы, поле ввода для имени файла и список имен сформированных файлов

В качестве исходных данных выступают шесть групп данных. Первая группа представлена набором данных, вводимых непосредственно с клавиатуры: степень полинома, уровень, код перемещений, номер термодатчика:

степень полинома	6	уровень	13
перемещение (X-1, Y-2, Z-3)	2	номер датчика	1
точка остывания 1	155	точка остывания 2	40

Рисунок 5.3 – Фрагмент рабочего окна программы с выделенной областью под ввод параметров для прогнозирования ТХ

Вторая группа данных – заранее сформированные текстовые файлы экспериментальных данных по ТХ для частот вращения: 1000, 1600 и 2000 об/мин:

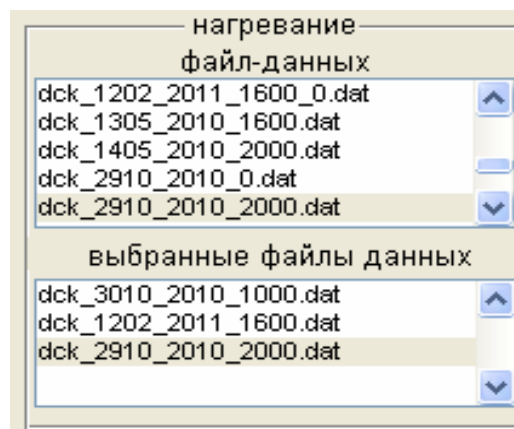
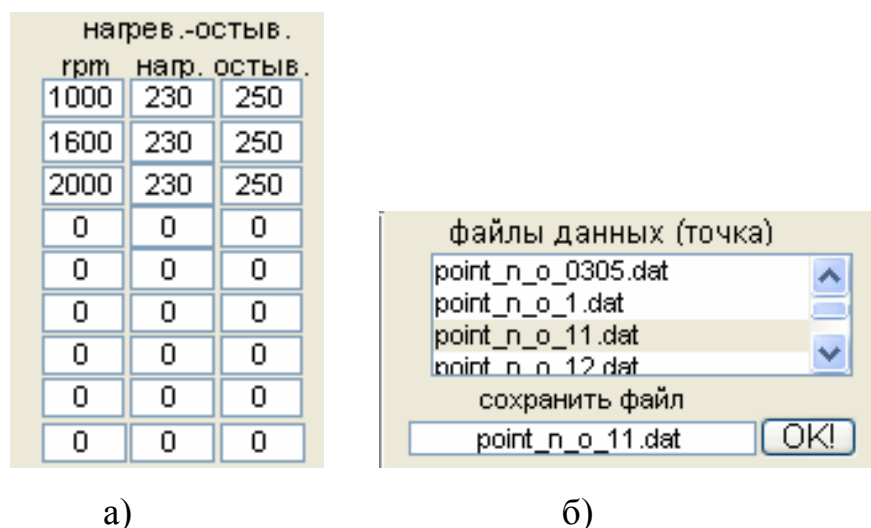


Рисунок 5.4 – Фрагмент рабочего окна программы с выделенной областью выбора файлов экспериментальных данных по ТХ

Третья группа данных – данные, определяющие структуру данных о базовых ТХ «нагревание – остывание», а также или формирование нового файла данных или выбор соответствующего файла данных, если он заранее сформирован:

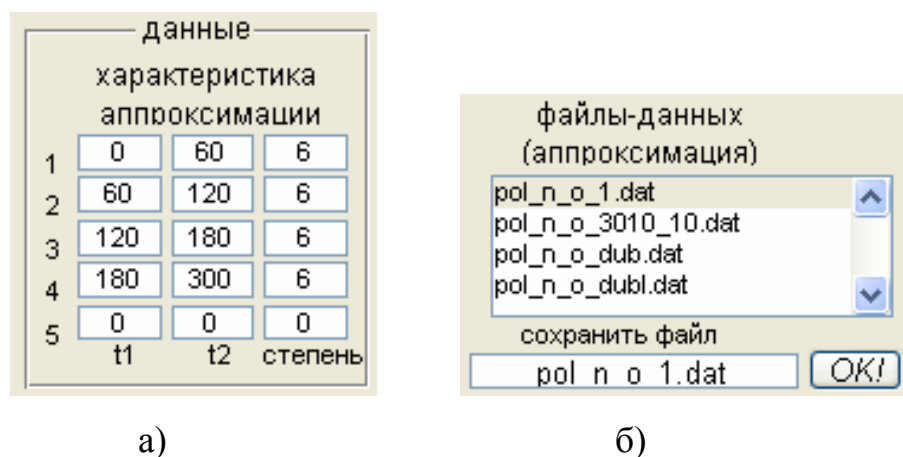


а – область ввода данных с клавиатуры; б – имена файлов данных

Рисунок 5.5 – Фрагменты рабочего окна программы

Приведенные данные на рисунке 5.5а означают, что в используемых данных о ТХ на временном интервале $[0, 230]$ происходит нагревание станка, а с момента времени, равного 250 минут, участок экспериментальной характеристики используется в качестве базовой характеристики при остывании станка. На рисунке 5.5б с именем «point_n_o_11.dat» сохранен файл данных (рисунок 5.5а).

Каждая из ТХ станка, работающего в условиях переменных тепловых режимов, представляется в виде отдельных участков кривых с различающейся кривизной. Поэтому, задаваемый общий параметр – «степень полинома» не во всех случаях позволяет построить адекватную аппроксимирующую функцию для ТХ на всей области ее определения. Для этого используется четвертая группа данных в виде таблицы, представленной тремя столбцами. Первый и второй столбцы задают область определения аппроксимирующей функции на отдельном участке, индекс строки соответствует номеру участка. Третий столбец задает значение степени полинома. Эта таблица, как и предыдущая группа данных (рисунок 5.5) заполняется непосредственным вводом в поля ввода с клавиатуры. Также как и в предыдущем случае, предусмотрено или формирование нового файла данных или выбор соответствующего файла данных, если он уже сформирован:



а – область ввода данных с клавиатуры; б – имена файлов данных

Рисунок 5.6 – Фрагменты рабочего окна программы

Для апробации разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик заранее были сформированы файлы экспериментальных данных для заданных циклограмм. Имена этих файлов формируют пятую группу данных:

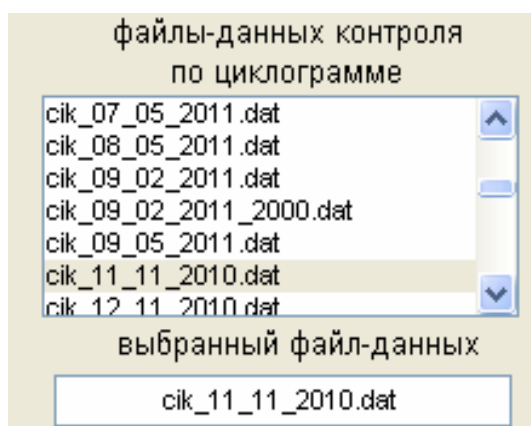


Рисунок 5.7 – Фрагменты рабочего окна программы, выводящий список файлов – данных для контроля циклограммы

Дополнительно, для визуального контроля тепловых характеристик предусмотрена шестая группа данных:

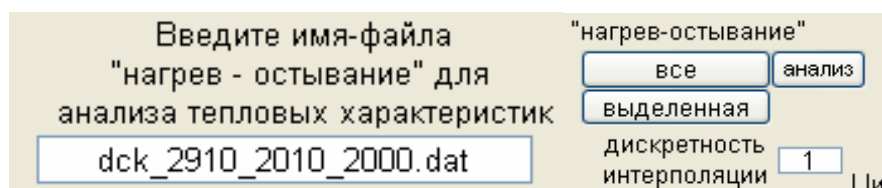


Рисунок 5.8 – Фрагменты рабочего окна программы

После завершения ввода исходных данных выполняется расчет, изложенный в пункте 4.3. Для этого последовательно активизируются расчеты и построения: построение аппроксимированных базовых ТХ, построение их нормированных аналогов, построение прогнозируемых ТХ. На рисунках 5.9 и 5.10 приведены соответствующие ТХ.

Используя нормированные базовые ТХ, были спрогнозированы и построены ТХ для заданной циклограммы. На рисунке 5.11 приведены спрогнозированные ТХ для четырех термодатчиков по результатам натурных (рисунок 5.11. индексы: а, в, д, ж), а также вычислительных экспериментов, проведенных на компьютерной модели НСС в САЕ – системе Ansys (рисунок 5.11, индексы: б, г, е, з):

- ТХ для первого термодатчика (рисунки 5.11а и 5.11б);

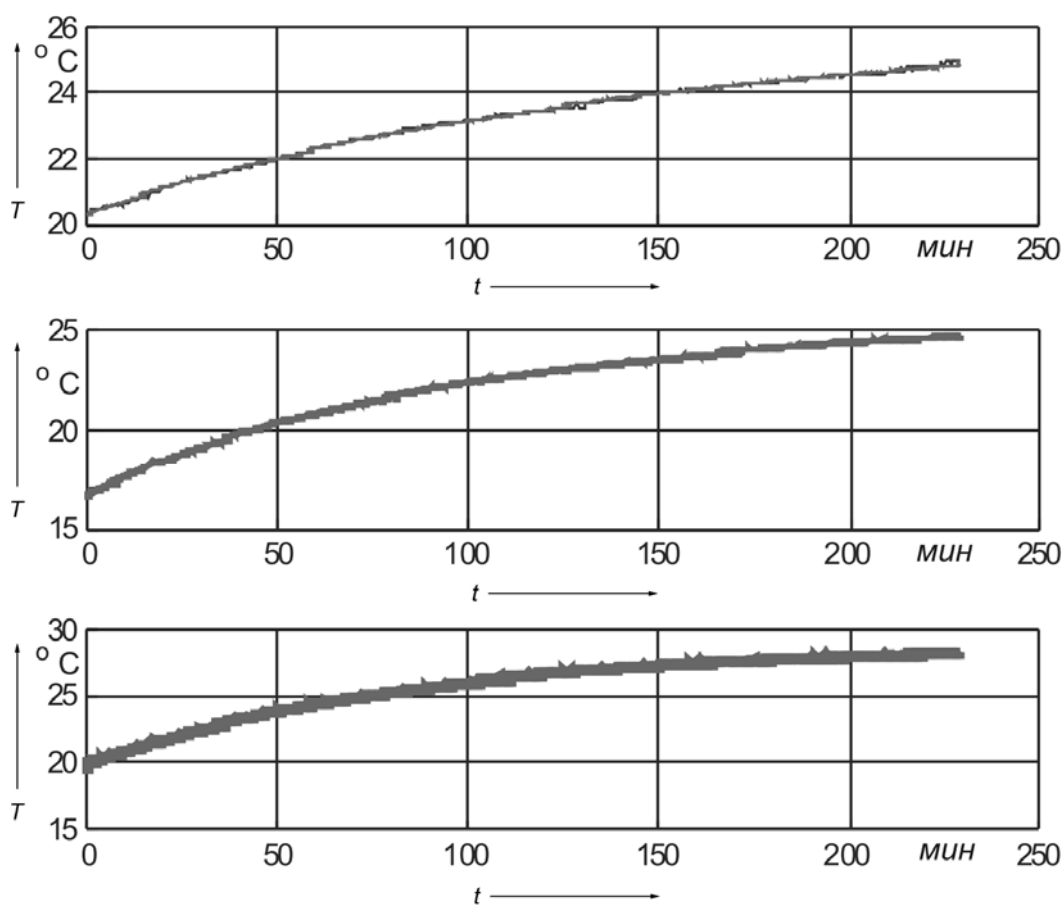


Рисунок 5.9 – Базовые аппроксимированные ТХ

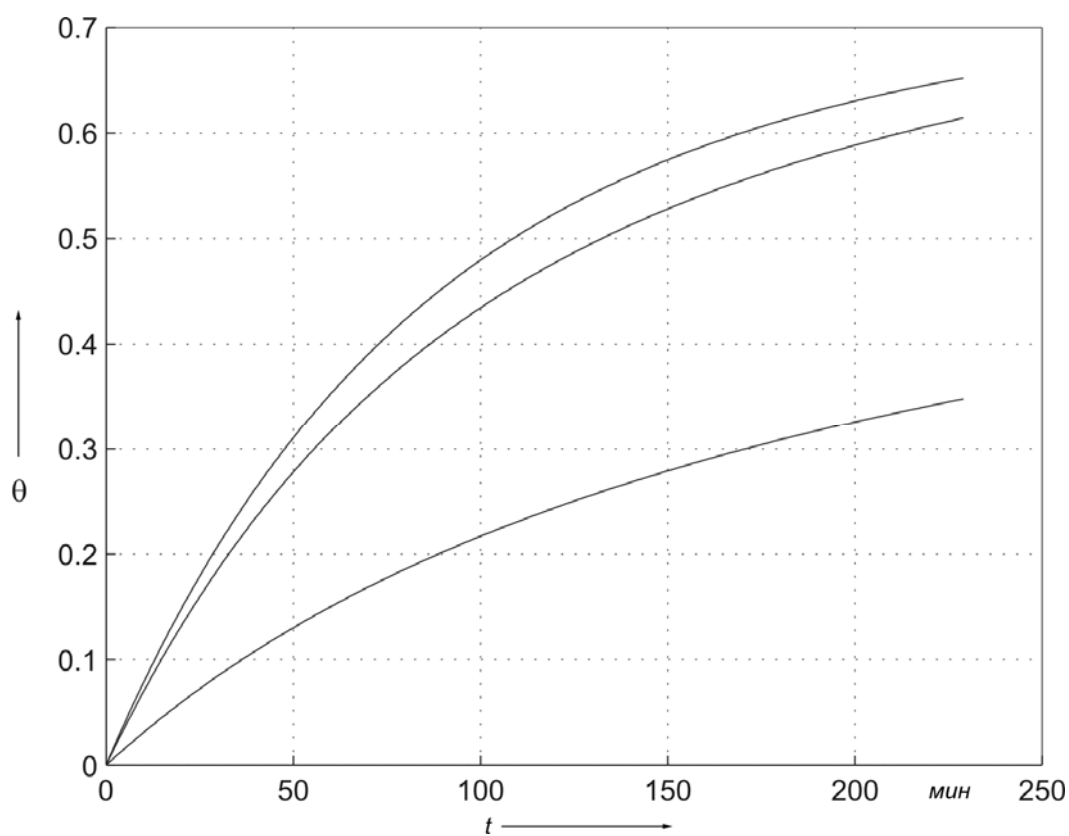
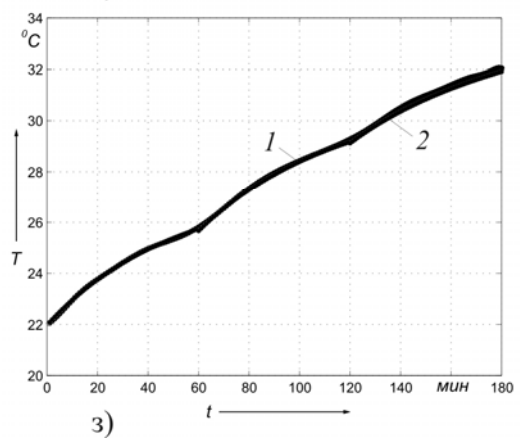
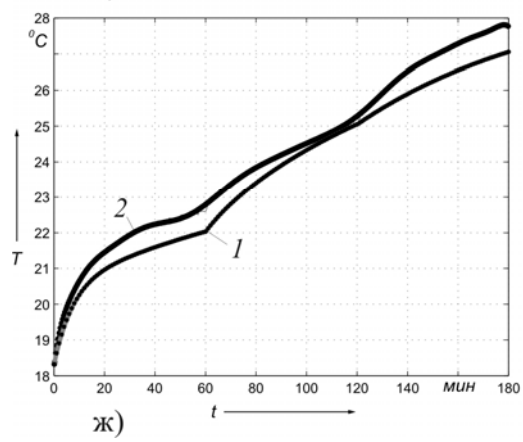
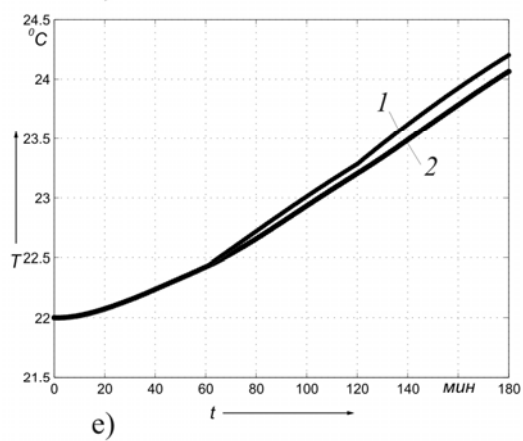
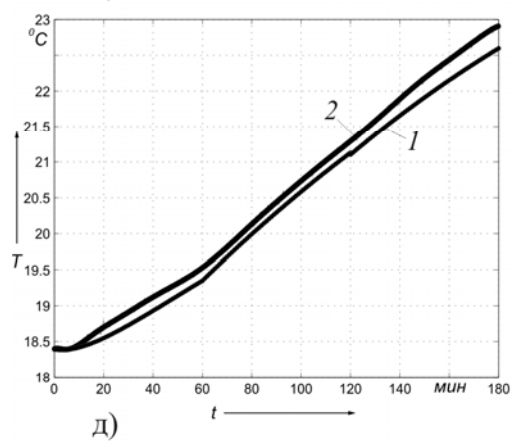
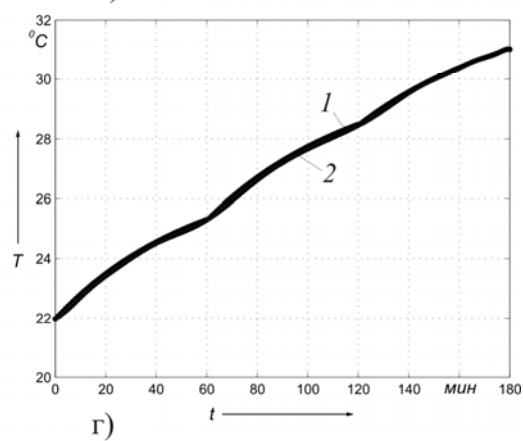
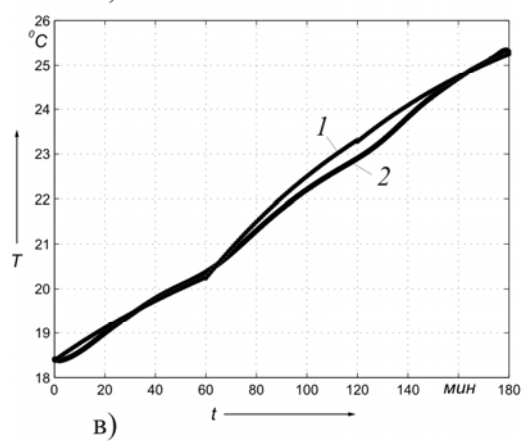
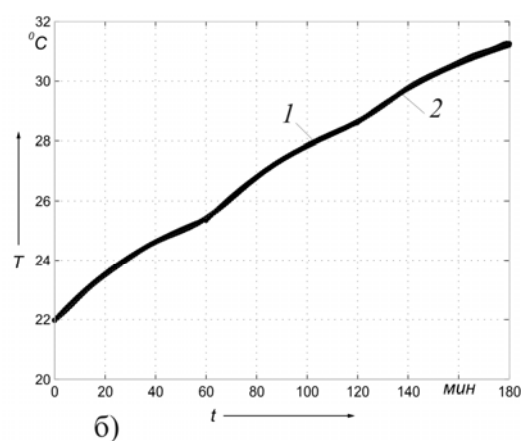
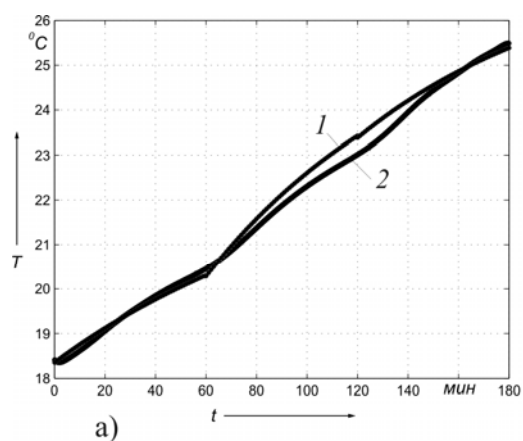


Рисунок 5.10 – Нормированные базовые ТХ



1 – спрогнозированная, *2* – экспериментальная характеристика

Рисунок 5.11 – Результаты прогнозирования ТХ для первого типа циклограмм

- ТХ для второго термодатчика (рисунки 5.11в и 5.11г);
- ТХ для третьего термодатчика (рисунки 5.11д и 5.11е);
- ТХ для четвертого термодатчика (рисунки 5.11ж и 5.11з).

Анализ полученных результатов показывает, что большая погрешность спрогнозированных ТХ фиксируется по результатам натурных экспериментов (рисунки 5.11, индексы: а, в, д, ж) – в пределах 0,5 °С. Это связано с присутствием в базовых ТХ натурных экспериментов – погрешности измерений, а также физических неопределенностей трибологических и тепловых процессов, протекающих в станке.

5.1.2 Прогнозирование температурных характеристик для II-го типа циклограмм

В качестве исходных данных используются ТХ процесса нагревания и остывания для одной фиксированной частоты вращения шпинделя станка, полученных из натурных и вычислительных экспериментов, выполненных по расчетной модели в САЕ-системе Ansys. Выбор заранее сформированных файлов базовых ТХ, полученных при остывании НСС, осуществляется из списка:

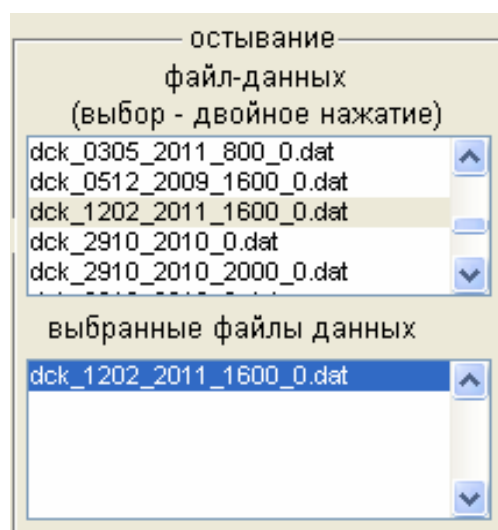


Рисунок 5.12 – Фрагмент рабочего окна

Скриншот рабочего окна программного средства с введенными исходными данными при прогнозировании ТХ для второго типа циклограмм (повторно-кратковременного режима работы) представлен на рисунке 5.13.

В качестве примера представлены результаты прогнозирования ТХ для повторно-кратковременного режима с периодом 30 минут (20 минут нагревания и 10 минут остывания).

Результаты прогнозирования ТХ для первого, второго, третьего и шестого термодатчика представлены на рисунке 5.14:

- ТХ для первого термодатчика (рисунки 5.14а и 5.14б);
- ТХ для второго термодатчика (рисунки 5.14в и 5.14г);
- ТХ для третьего термодатчика (рисунки 5.14д и 5.14е);
- ТХ для четвертого термодатчика (рисунки 5.14ж и 5.14з).

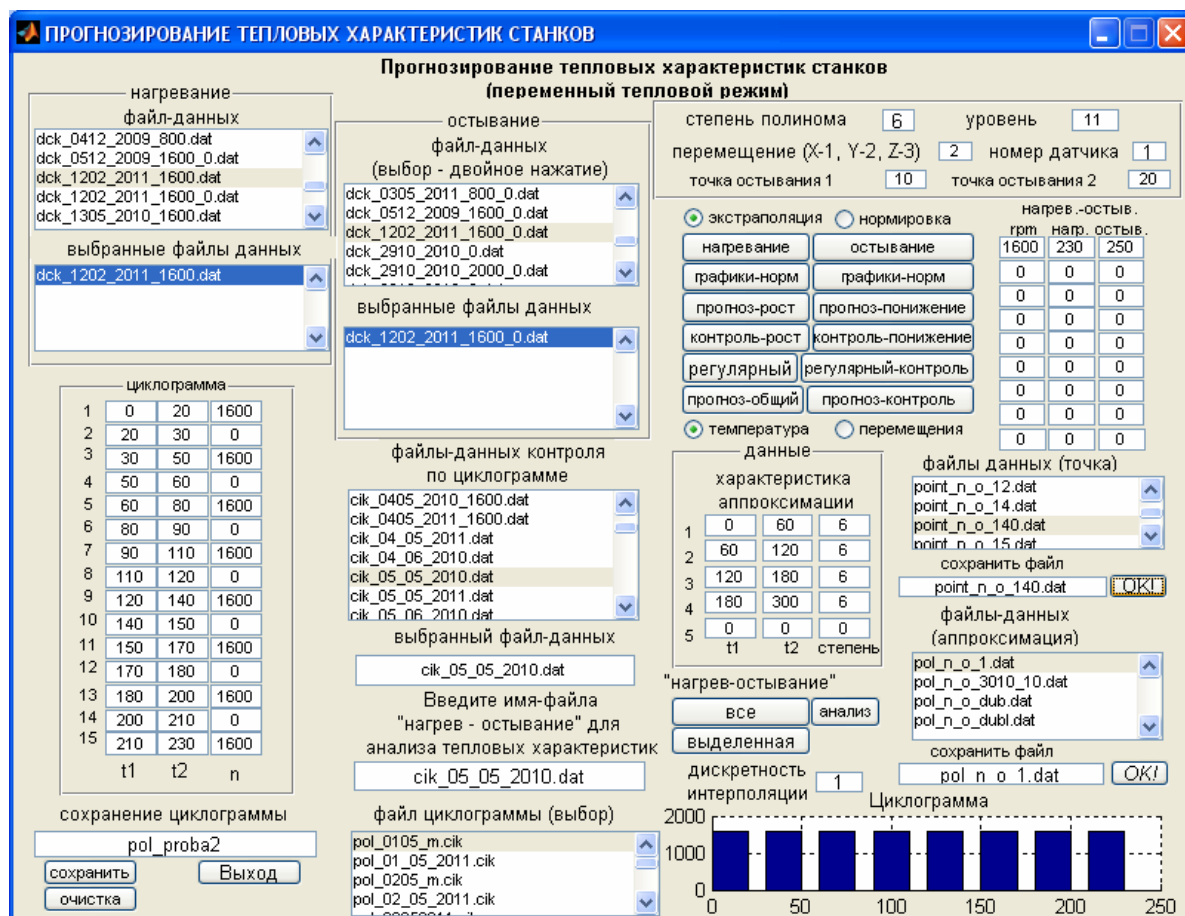
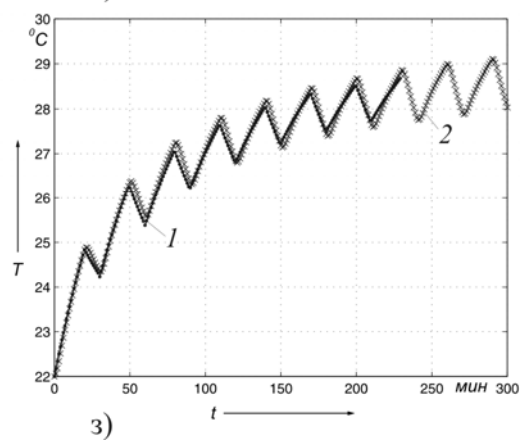
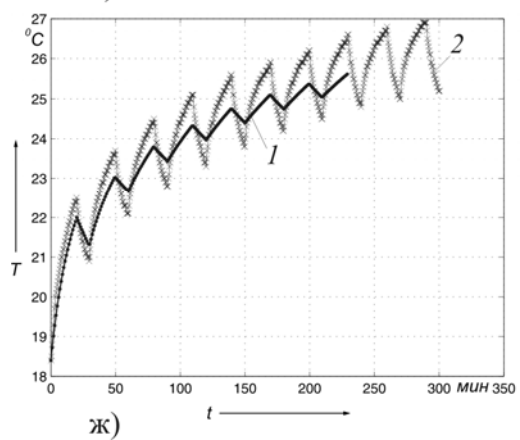
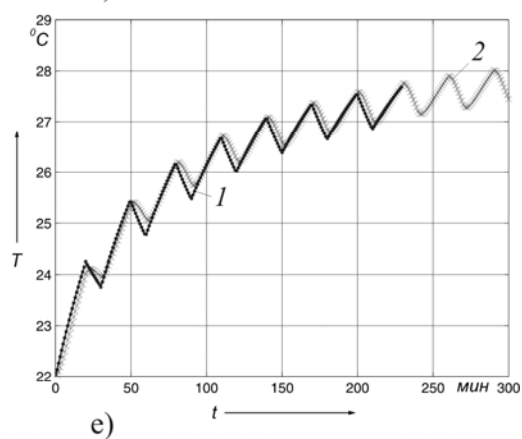
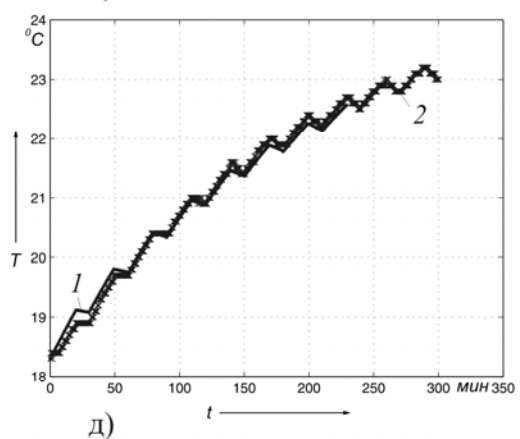
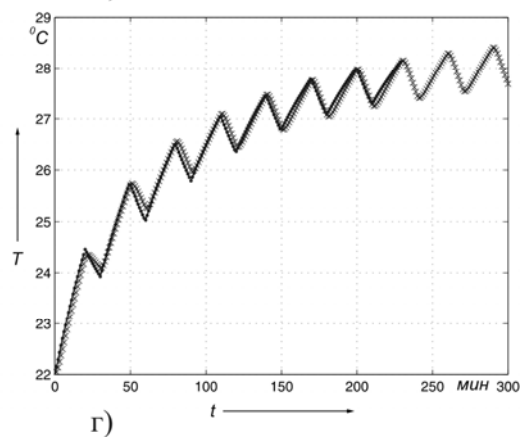
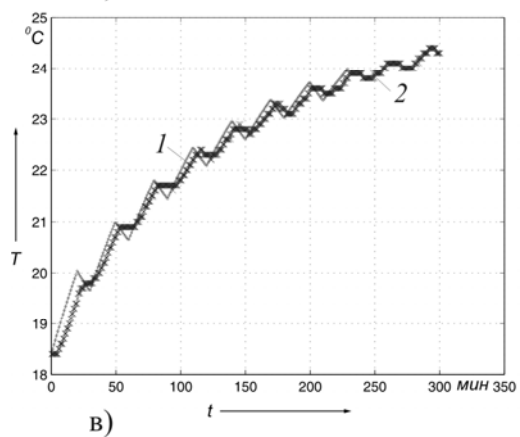
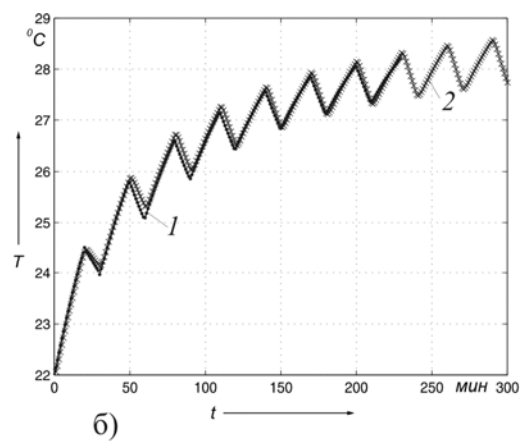
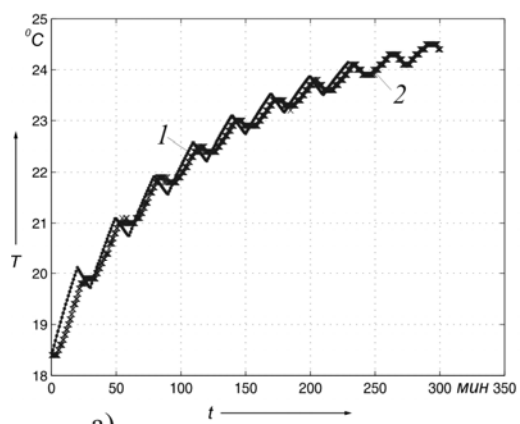


Рисунок 5.13 – Скриншот рабочего окна программного средства при прогнозировании ТХ для второго типа циклограмм



1 – спрогнозированная, *2* – экспериментальная характеристика.

Рисунок 5.14 – Результаты прогнозирования ТХ для второго типа циклограмм

Индексация результатов прогнозирования используется та же, что и в предыдущем параграфе: натурные экспериментальные данные имеют индексы: а, в, д, ж; данные, полученные из расчетной модели НСС в ходе компьютерного моделирования в САЕ – системе Ansys имеют индексы: б, г, е, з.

Анализ результатов прогнозирования температурных характеристик для повторно-кратковременного режима работы станка показал, что погрешность прогнозирования зависит от точности выбора участков соответствующих экспериментальных ТХ остывания (пункт 4.2). Для компьютерной модели НСС результаты прогнозирования отличаются существенно меньшей погрешностью, т.к. в данном случае полностью исключены погрешности измерений, а также объективные факторы случайности и зависимости от начальных условий протекания тепловых процессов в НСС.

5.1.3 Прогнозирование температурных характеристик для III-го типа циклограмм

В качестве исходных данных для прогнозирования ТХ для третьего типа циклограмм используем так же, как и для выше описанных типов циклограмм экспериментальные и расчетные (полученные в ходе компьютерного моделирования в САЕ-системе Ansys) ТХ для первого, второго, третьего и шестого термодатчиков.

Скриншот рабочего окна программного средства с введенными исходными данными представлен на рисунке 5.15.

На рисунке 5.16 приведены результаты прогнозирования ТХ:

- ТХ для первого термодатчика (рисунки 5.16а и 5.16б);
- ТХ для второго термодатчика (рисунки 5.16в и 5.16г);
- ТХ для третьего термодатчика (рисунки 5.16д и 5.16е);
- ТХ для четвертого термодатчика (рисунки 5.16ж и 5.16з).

Индексация результатов прогнозирования используется та же, что и в предыдущем параграфе: натурные экспериментальные данные имеют индексы: а, в, д, ж; данные из расчетной модели НСС в ходе компьютерного моделирования в

САЕ – системе Ansys имеют индексы: б, г, е, з.

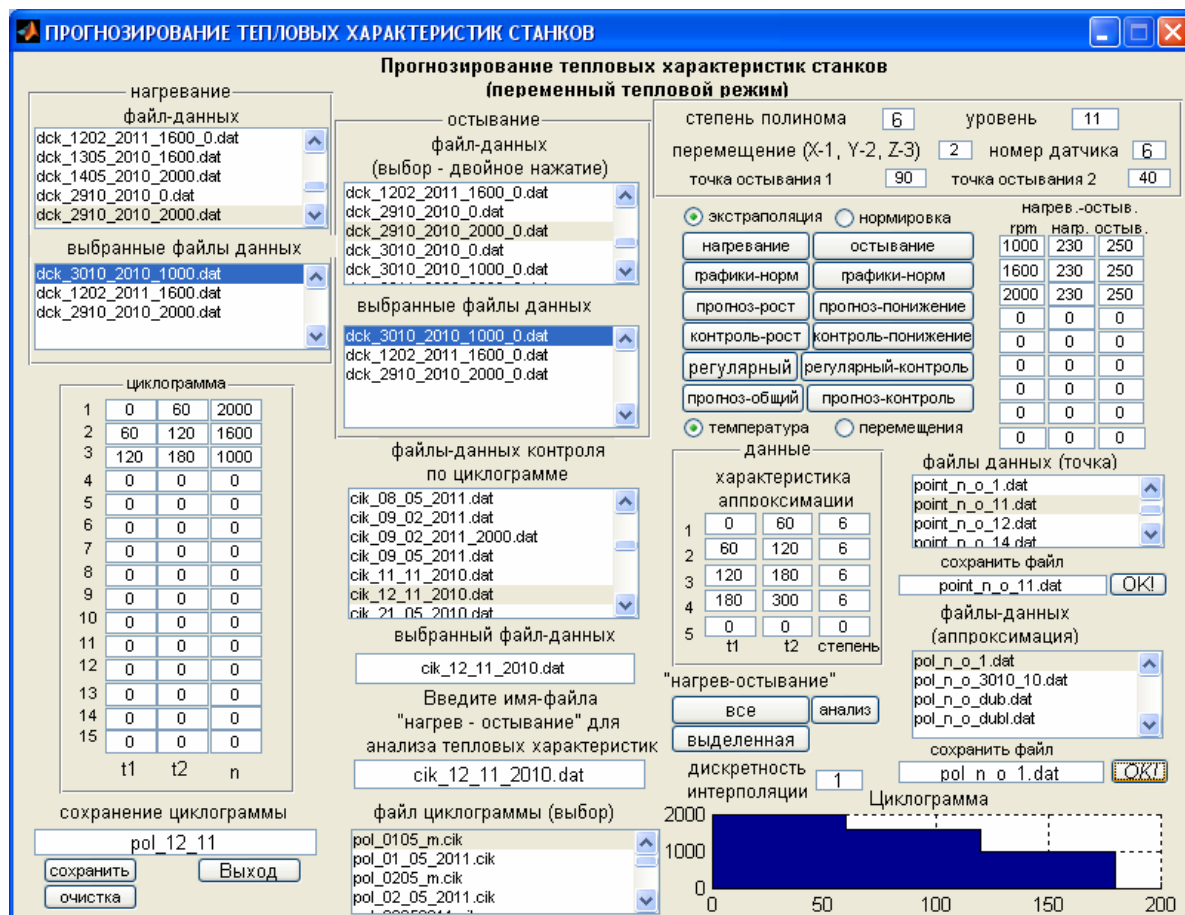
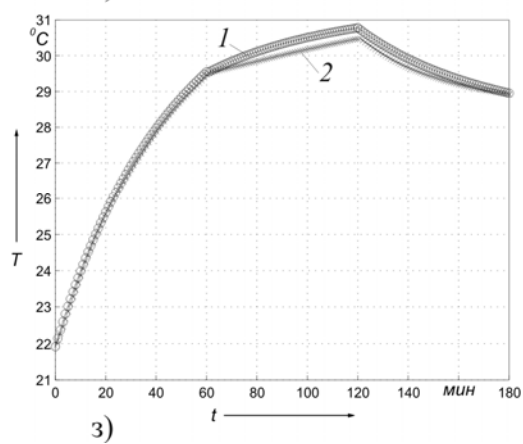
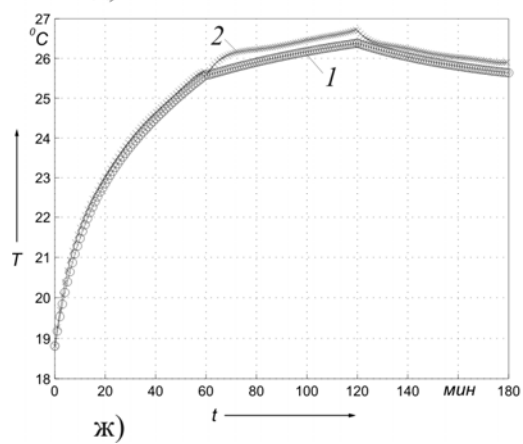
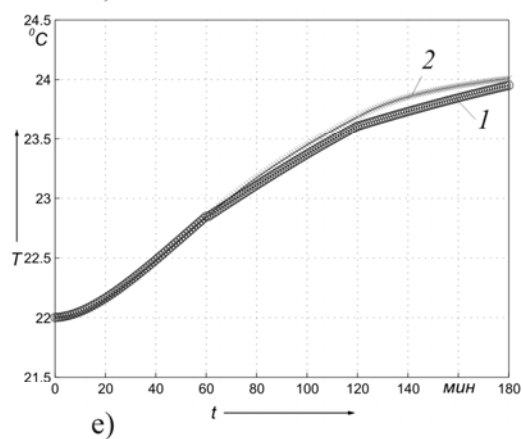
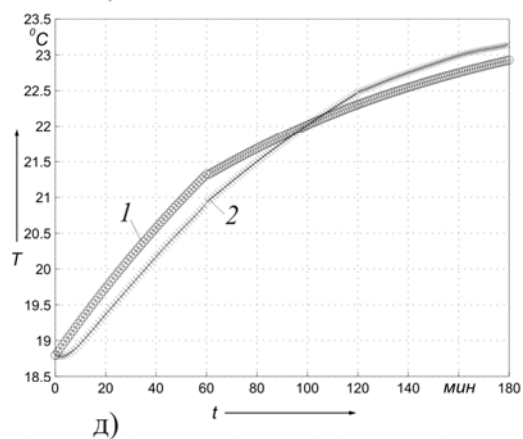
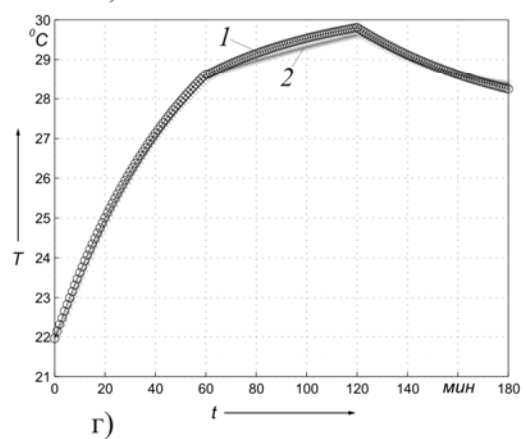
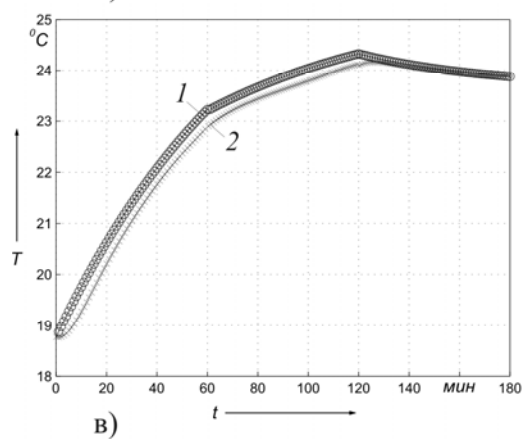
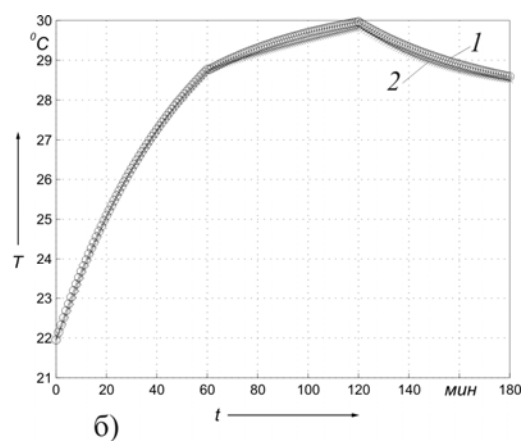
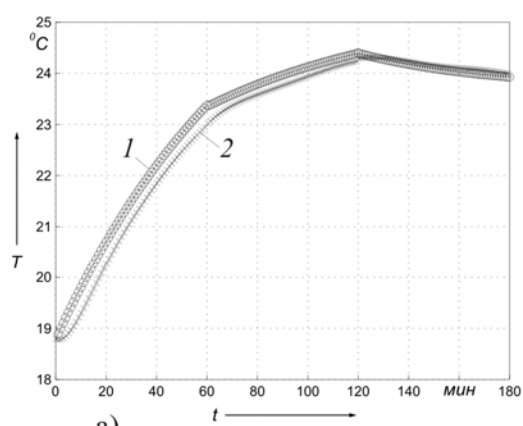


Рисунок 5.15 – Скриншот рабочего окна программного средства с введенными данными для третьего типа циклограмм

Как и при прогнозировании ТХ выше описанных типов циклограммы, меньшая погрешность была зафиксирована при использовании компьютерной модели НСС, максимальная погрешность также не превысила 0,5 °С.

5.1.4 Прогнозирование температурных характеристик для IV-го типа циклограмм

Скриншот рабочего окна программного средства при прогнозировании ТХ для четвертого обобщенного типа циклограмм представлен на рисунке 5.17.



1 – спрогнозированная, 2 – экспериментальная характеристика.

Рисунок 5.16 – Результаты прогнозирования ТХ для третьего типа циклограмм

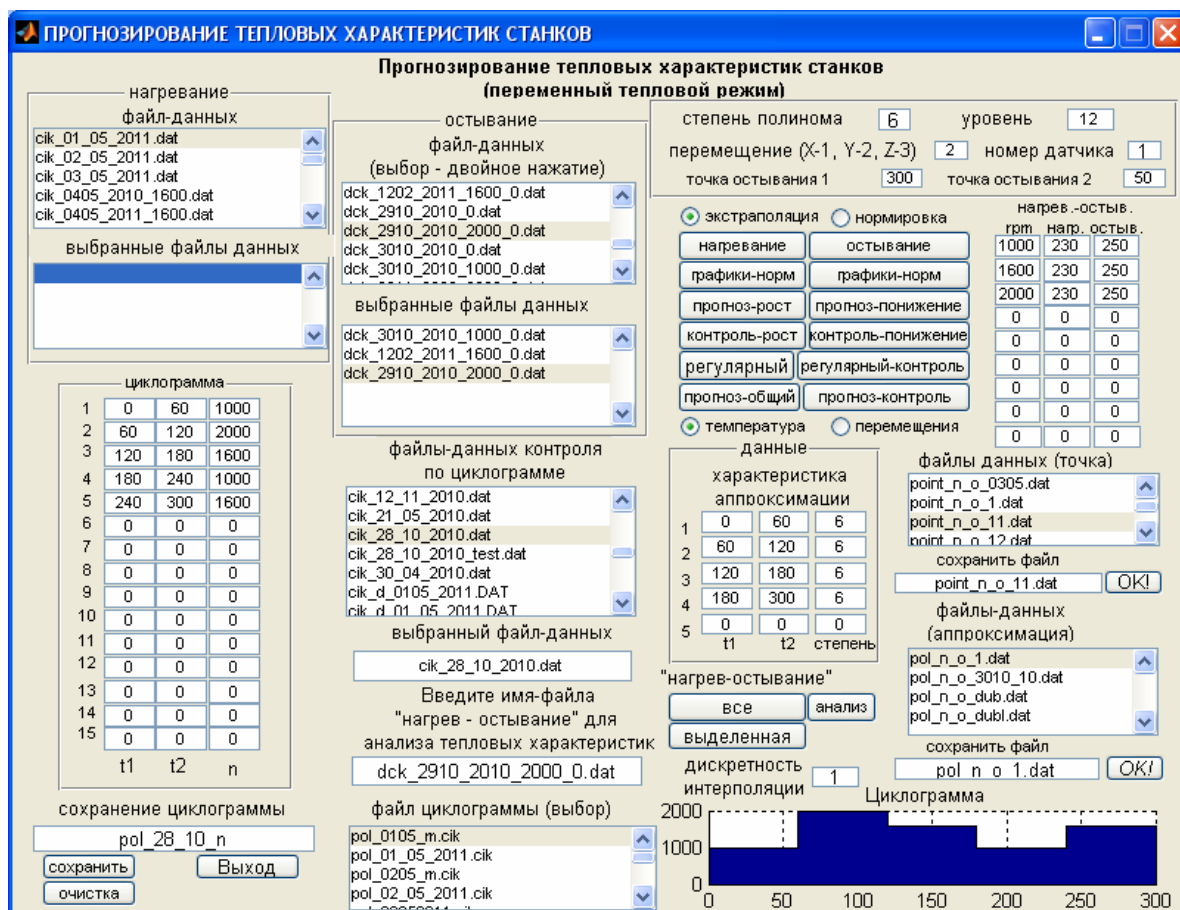
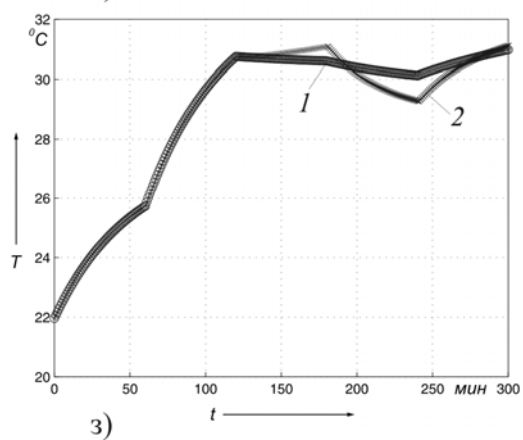
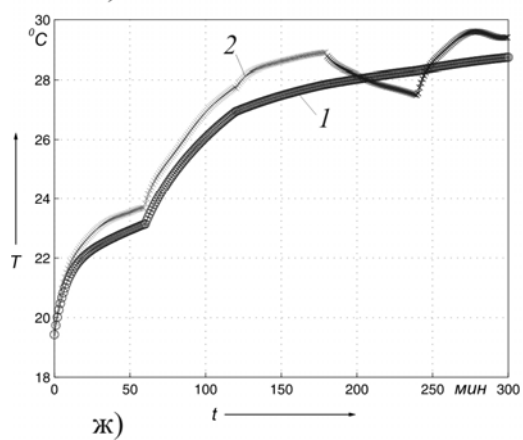
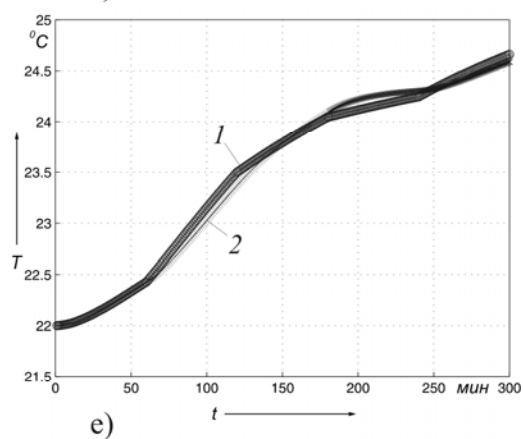
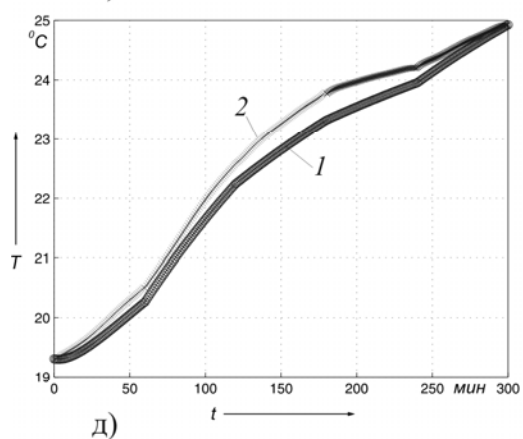
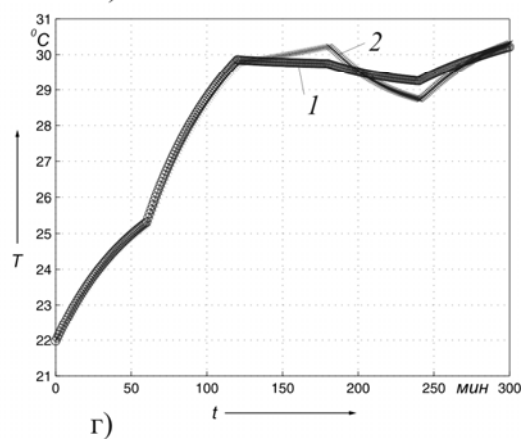
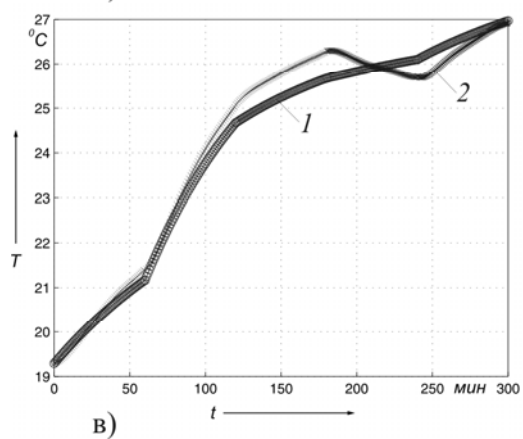
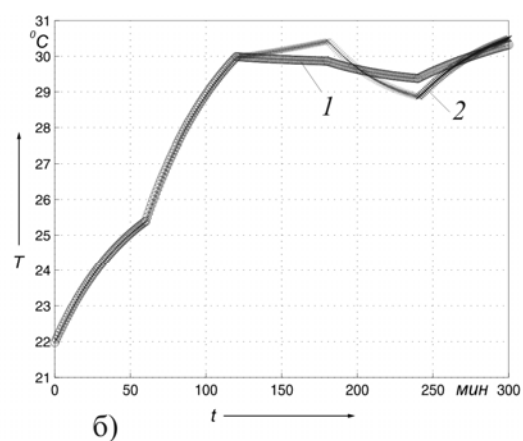
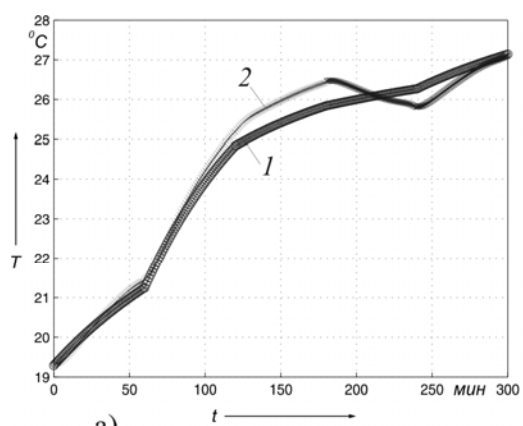


Рисунок 5.17 – Скриншот рабочего окна программного средства с введенными данными для четвертого типа циклограмм

На рисунке 5.18 приведены восемь вариантов спрогнозированных ТХ. Спрогнозированные ТХ с индексами: а, в, д, ж, используют экспериментальных базовые ТХ; спрогнозированные ТХ с индексами: б, г, е, з используют ТХ, полученные по компьютерной модели НСС в САЕ– системе Ansys для тех же четырех термодатчиков:

- ТХ для первого термодатчика (рисунок 5.18а и 5.18б);
- ТХ для второго термодатчика (рисунок 5.18в и 5.18г);
- ТХ для третьего термодатчикана (рисунок 5.18д и 5.18е);
- ТХ для шестого термодатчика (рисунок 5.18ж и 5.18з).

Анализ полученных результатов прогнозирования температурных характеристик позволил получить следующие результаты:



1 – спрогнозированная, *2* – экспериментальная характеристика.

Рисунок 5.18 – Результаты прогнозирования ТХ для четвертого типа циклограмм

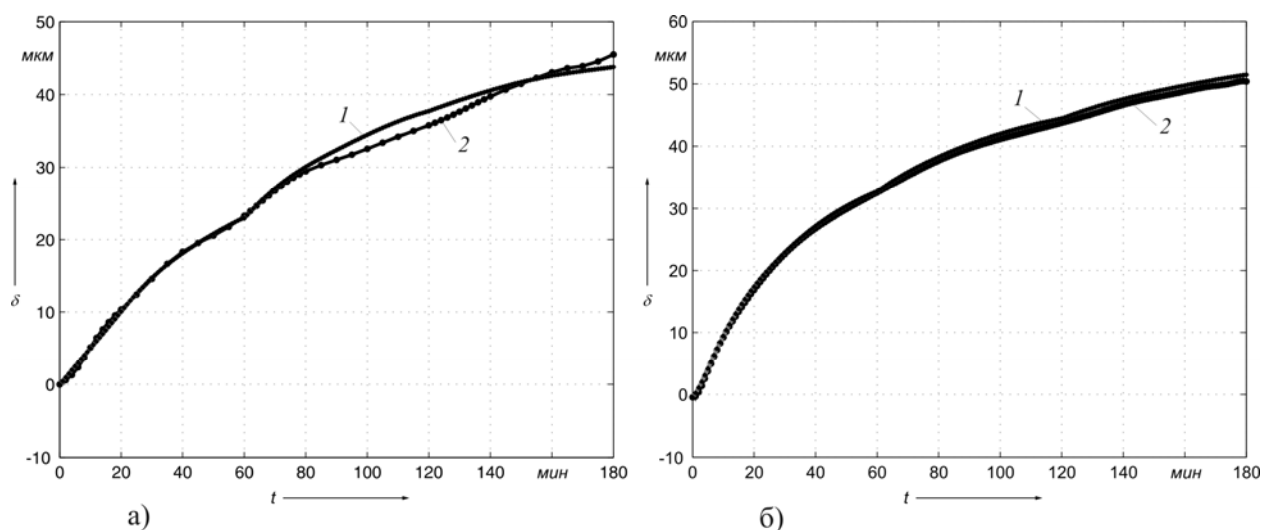
– погрешность прогнозирования ТХ в различных точках НСС зависит от удаленности от тепловых источников станка; в точках НСС, максимально приближенным к тепловым источникам станка погрешность не превышает 10 %, в остальных точках НСС максимальная погрешность составляет до 20 %;

– погрешность прогнозирования существенно зависит от точности базовых экспериментальных ТХ.

5.2 Прогнозирование характеристик температурных перемещений

В качестве исходных данных для прогнозирования ХТП используем экспериментальные характеристики и характеристики, сформированные из вычислительных экспериментов по расчетной модели, выполненной в САЕ- системе Ansys.

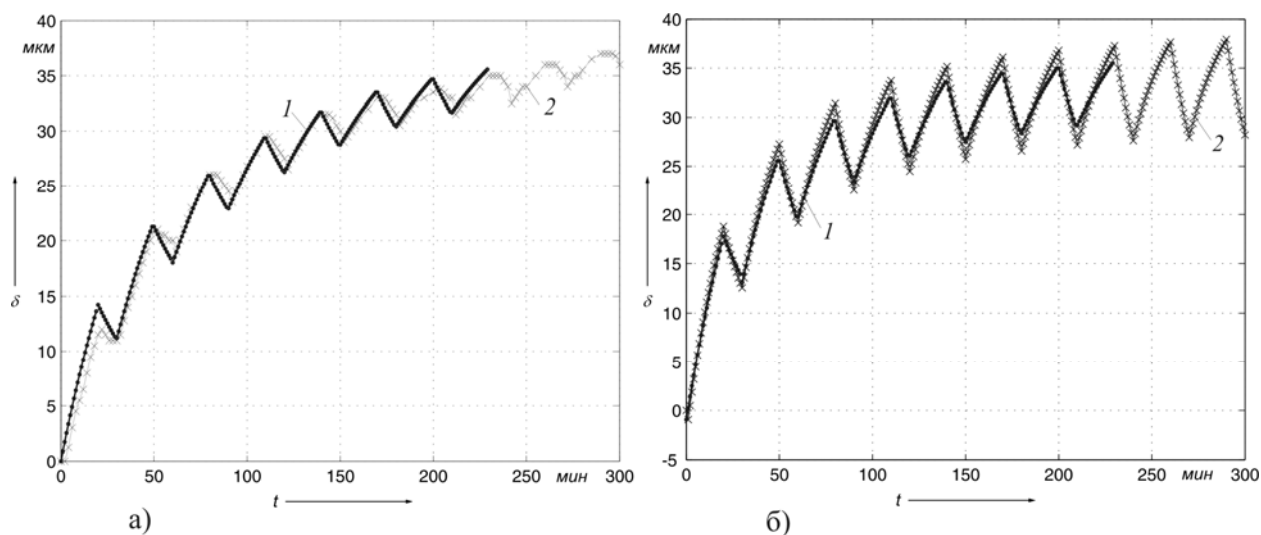
По аналогии с предыдущим пунктом (5.1) формируются исходные данные и строятся спрогнозированные характеристики для четырех типов циклограмм. На рисунках 5.19 – 5.22 приведены результаты прогнозирования ХТП вдоль оси шпинделя для четырех типов циклограмм по результатам натурных и вычислительных экспериментов:



1 – спрогнозированная, 2 – экспериментальная характеристика.

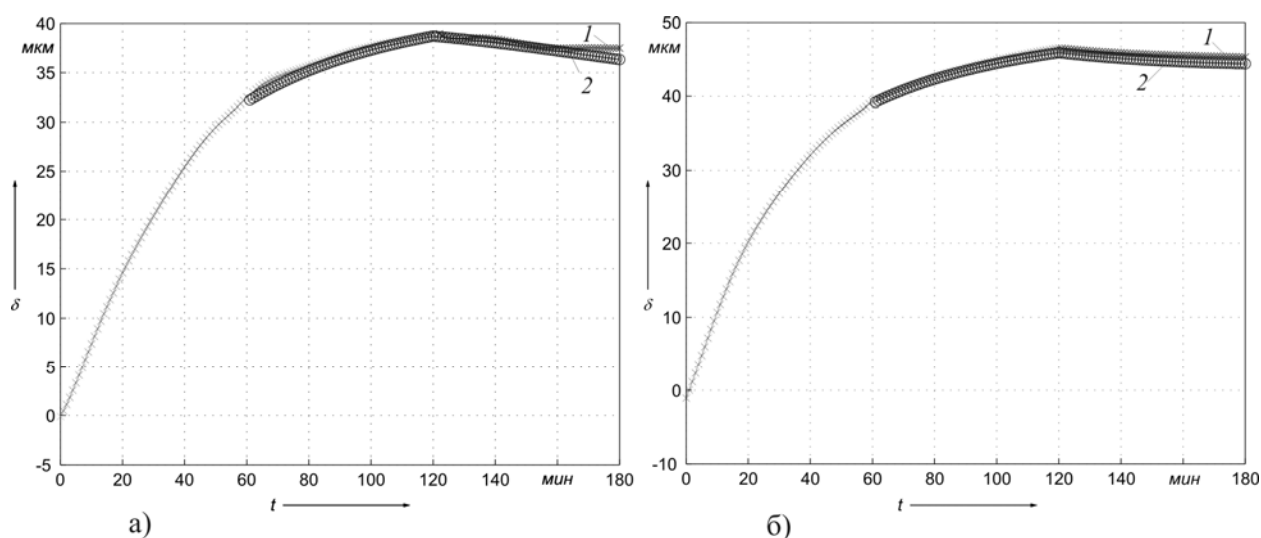
Рисунок 5.19 – Результаты прогнозирования ХТП вдоль оси шпинделя для первого типа циклограмм

- ХТП для первого типа циклограмм (рисунок 5.19а и 5.19б);
- ХТП для второго типа циклограмм (рисунок 5.20а и 5.20б);
- ХТП для третьего типа циклограмм (рисунок 5.21а и 5.21б);
- ХТП для четвертого типа циклограмм (рисунок 5.22а и 5.22б).



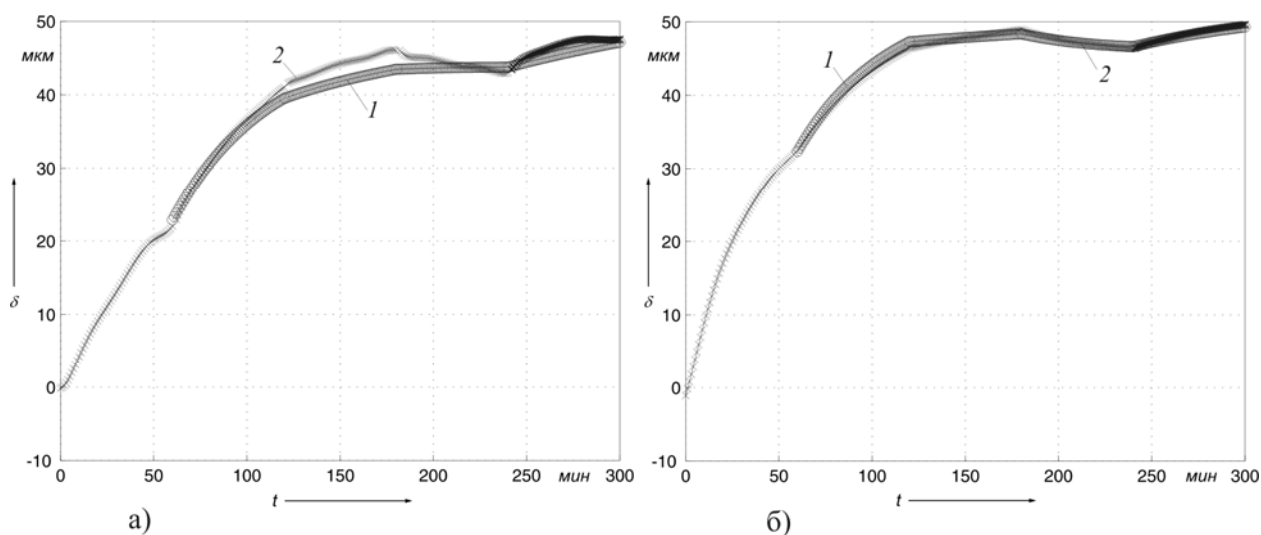
1 – спрогнозированная, 2 – экспериментальная характеристика.

Рисунок 5.20 – Результаты прогнозирования ХТП вдоль оси шпинделя для второго типа циклограмм



1 – спрогнозированная, 2 – экспериментальная характеристика.

Рисунок 5.21 – Результаты прогнозирования ХТП вдоль оси шпинделя для третьего типа циклограмм



1 – спрогнозированная, 2 – экспериментальная характеристика.

Рисунок 5.22 – Результаты прогнозирования ХТП вдоль оси шпинделя для четвертого типа циклограмм

Проведенные исследования показали, что:

- погрешность прогнозирования ХТП существенно различается по координатным осям; по координате, соответствующей оси шпинделя она является минимальной и не превышает 10 %;
- по остальным координатным осям погрешность прогнозирования существенно превышает 10 %, поэтому разработанный метод прогнозирования не может использоваться для прогнозирования характеристик температурных перемещений по другим координатным осям;
- погрешность прогнозирования существенно зависит от типа циклограммы работы станка; минимальная погрешность фиксировалась для циклограммы первого типа; наибольшая погрешность фиксировалась для циклограммы второго типа;
- существенное влияние на погрешность прогнозирования тепловых характеристик для циклограмм второго и третьего типов оказывает выбор участков соответствующих экспериментальных тепловых характеристик остывания.

5.3 Средства управления исполнительными органами станка по снижению его температурной погрешности

Традиционно, для станков с ЧПУ методы компенсации температурной погрешности основываются на прогнозировании температурных перемещений по данным от температурных датчиков, устанавливаемых на станке. Для этого заранее устанавливается функциональная связь «перемещение – температура» $\delta(T)$. Однако, проведенные экспериментальные исследования доказали возможность получения больших погрешностей для данной методологии, т.к. функция $\delta(T)$ существенно зависит от циклограммы работы станка и тепловой нагрузки (глава 2) – диапазон температурных перемещений при фиксированной температуре может составлять более 50 % от минимального значения перемещения.

На рисунке 5.23 представлена функциональная схема реализации коррекции температурной погрешности станка на основе метода прогнозирования его тепловых характеристик. Схема включает семь блоков.

Задающий блок ЗБ определяет циклограмму работы станка и параметры точности детали для каждой поверхности с учетом переходов. Блок прогнозирования БП включает реализацию разработанного метода прогнозирования тепловых характеристик станка. В блоке компенсации БК на основе алгоритма компенсации температурной погрешности станка формируется система корректирующих воздействий. Блок внесения изменений БВИ вносит изменения в текст управляющей программы для СЧПУ. Отработка корректирующих воздействий в СЧПУ проявляется на перемещениях исполнительных устройств ИУ, например шпиндельной головки. В качестве объекта управления ОУ в этом схеме выступают температурные смещения исполнительных устройств.

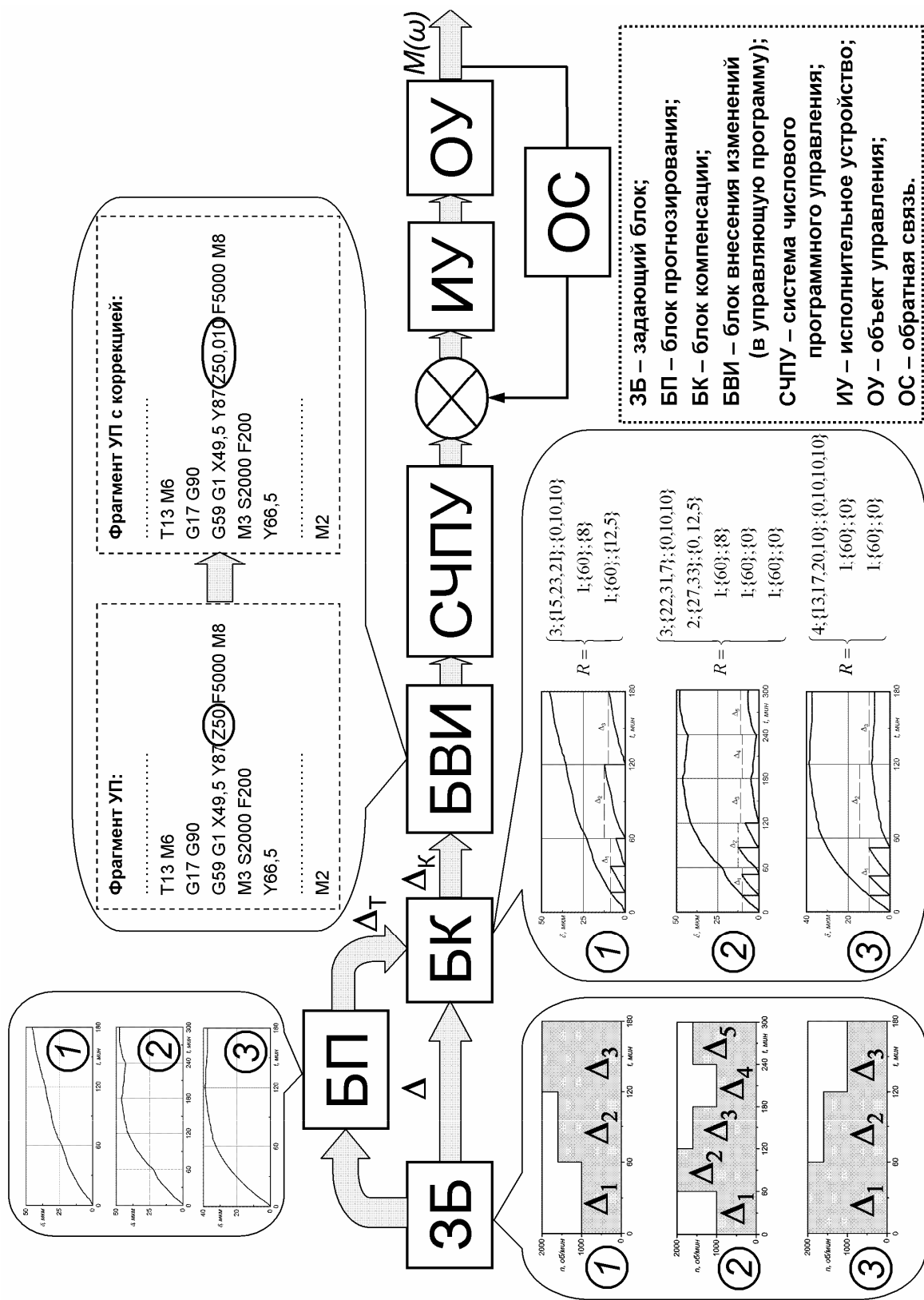


Рисунок 5.23 – Функциональная схема реализации коррекции температурной погрешности станка на основе метода прогнозирования тепловых характеристик

На рисунке 5.24 приведена схема алгоритма компенсации температурной погрешности станка, реализованного в БК. В предлагаемом алгоритме функция $\delta(T)$ не используется. Алгоритм включает восемь основных блоков. В первом блоке исходных данных используются: чертежи заготовки и детали; технологический процесс обработки детали и управляющая программа для станка с ЧПУ. Это позволяет сформировать циклограмму работы станка и перейти ко второму блоку, в котором формируется вектор параметров точности детали для каждой поверхности с учетом технологических переходов, предусматриваемых технологическим процессом обработки детали. Следующий третий блок представляет собой циклически повторяющуюся процедуру построения прогнозируемой тепловой характеристики станка для одной координаты. В четвертом блоке формируется вектор точности обработки, обрабатываемый станком для детали. Из исследований других А. С. Проникова, Д. Н. Решетова, В. С. Стародубова и др. установлено, что в общем балансе точности обработки влияние станка составляет до 40 %.

Это позволяет сформировать вектор параметров Δ_k , который выступает в качестве вектора требуемой размерной точности, и он же определяет величину корректирующего воздействия. Количественные значения компонентов вектора Δ_k устанавливаются в относительном соотношении к величине допуска на размер:

$$\Delta_k = \{k\} \{\Delta\}, \text{ где } \{k\} = \{k_0, k_1, k_2, k_3\} \quad (5.1)$$

Параметр $\{k\}$ позволяет задать собственное влияние станка в общем балансе точности. Чем меньше значение $\{k\}$, тем жестче требования к точности обработки. В данном алгоритме приняты четыре уровня точности. Переход от одного уровня к другому осуществляется циклически по результатам измерений в цикле D. В разработанном алгоритме шаг итерации задается в цикле A.

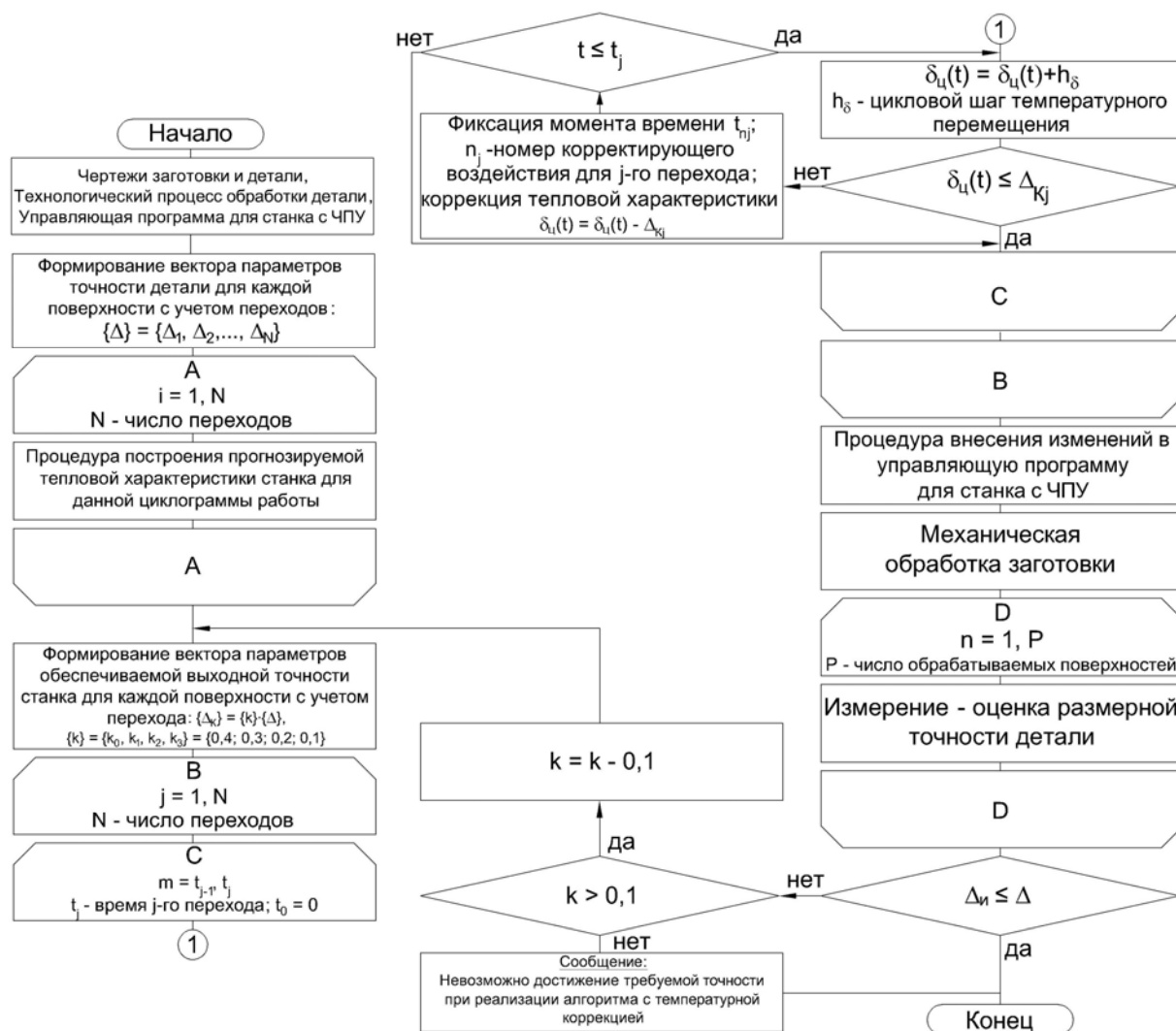


Рисунок 5.24 – Схема алгоритма компенсации температурной погрешности станка, работающего в переменных тепловых режимах

В пятом блоке циклически, в зависимости от перехода, осуществляется построение скорректированного температурного перемещения $\delta_y(t)$. На каждом временном шаге осуществляется проверка условия выхода прогнозируемого температурного перемещения за границы Δ_k . При выходе за установленные пределы Δ_k фиксируется момент времени t_{ij} и выполняется коррекция прогнозируемой тепловой характеристики:

$$\delta_y(t) = \delta_y(t) - \Delta_{kj} \quad (5.2)$$

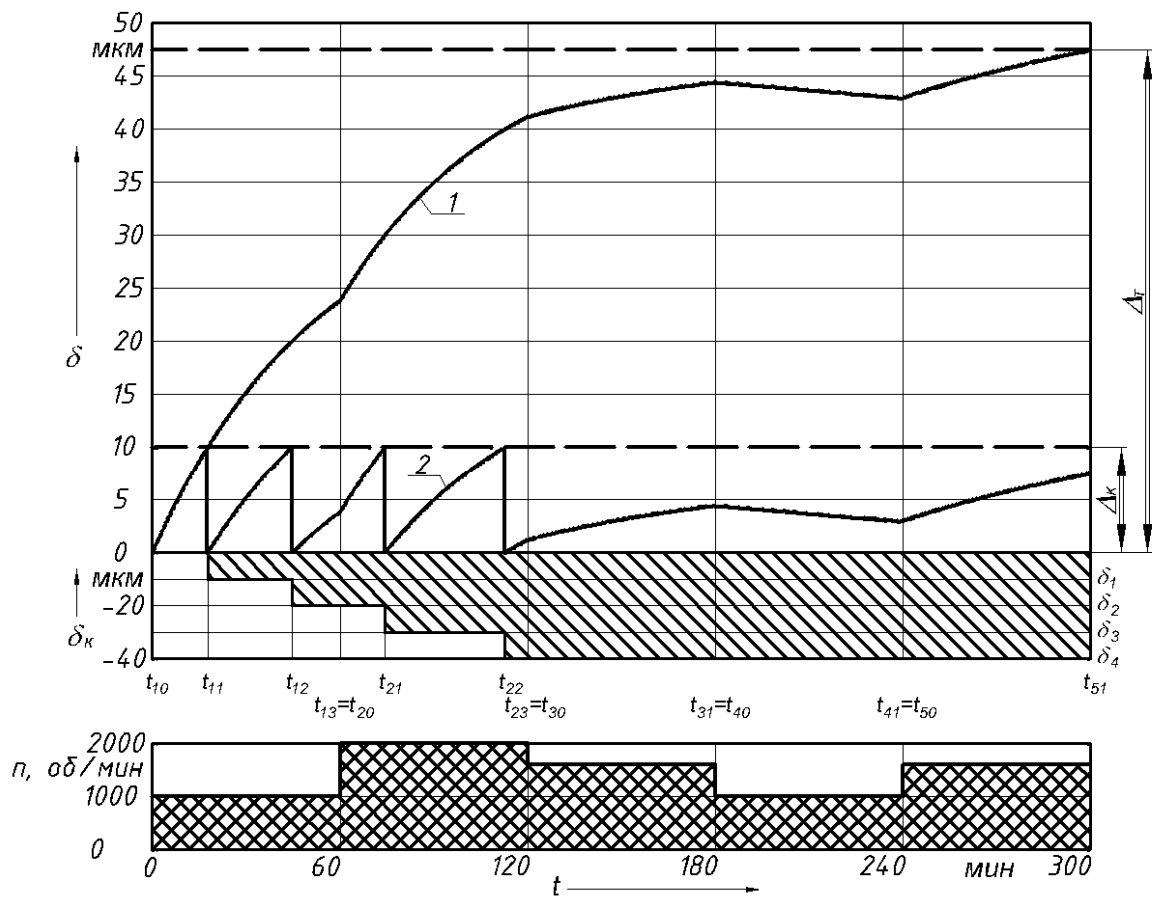
где Δ_{kj} – величина корректирующего воздействия Δ_k для j -го перехода или участка циклограммы.

Индексация корректирующего воздействия i выполняется автоматически и для каждого j -го перехода различна. Количество корректирующих воздействий на каждом участке циклограммы определяется исходя из величины прогнозируемых перемещений, величины размерной точности Δ_k и длительности участка циклограммы.

В шестом блоке реализуется процедура внесения в управляющую программу для станка с ЧПУ по сформированным векторам времени $\{t_{n_j j}\}$ и векторам корректирующих воздействий для каждого перехода $\{\delta_{kj}\}$.

Седьмой блок – это реализация механообработки на станке по скорректированной программе для стойки ЧПУ. В восьмом блоке осуществляется измерение каждого размера детали, по результатам которого вносятся изменения в величину корректирующих воздействий Δ_k .

На рисунке 5.25 приведена схема реализации алгоритма компенсации температурной погрешности станка [42, 45 и 97]. На рисунке кривая 1 – это спрогнозированная ХТП для циклограммы, верхней пунктирной линией обозначена величина максимальной температурной погрешности – Δ_T . Так как приведенный рисунок – это теоретическая диаграмма, то величина требуемой точности Δ совпадает с величиной образуемой температурной погрешности при использовании корректирующих воздействий – Δ_k (т.е. $\Delta = \Delta_k$, поэтому величина Δ не приведена).



▨ - циклограмма;

▨ - график корректирующих воздействий;

1 - ХТП без коррекции температурной погрешности;

2 - ХТП с коррекцией температурной погрешности.

Рисунок 5.25 – Схема реализации алгоритма компенсации температурной погрешности станка

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

$$R = \begin{cases} n_1; \{t_1\}; \{\delta_1\} \\ \dots \\ n_m; \{t_m\}; \{\delta_m\} \end{cases} \quad (5.3)$$

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-ом и m -ом технологических переходах и им соответствующие последовательности интервалов времени;

$\{\delta_1\} = (\delta_{11}, \dots, \delta_{1p_1})$, $\{\delta_m\} = (\delta_{m1}, \dots, \delta_{mp_m})$ – соответствующие последовательности корректирующих воздействий на 1-ом и m -ом технологических переходах.

В общем случае величина Δ для каждого участка циклограммы различная, т.к. она определяется параметрами точности различных размеров по чертежу детали. В рассматриваемом варианте алгоритма показатели точности Δ для каждого перехода приняты одинаковыми, равными 10 мкм. Количество корректирующих воздействий на каждом участке циклограммы определяется исходя из следующих факторов: величины прогнозируемых перемещений; величины показателя точности Δ ; длительности участка. В качестве примера рассмотрим процедуру формирования результирующих воздействий на первом участке:

- согласно прогнозу тепловых характеристик, формируется температурное перемещение на первом участке циклограммы; превышение установленной величины показателя точности Δ наступает в момент времени t_{11} ; тем самым определяется первый интервал времени $[t_{10}, t_{11}]$, по истечению которого вводится первое корректирующее воздействие;

- задавая корректирующее воздействие δ_1 , равное показателю точности Δ , получают измененную характеристику 2, представляющую собой параллельный перенос характеристики 1 вдоль ординаты;

- в новый момент времени t_{12} опять наступает превышение установленной величины показателя точности Δ – так определяется второй интервал времени $[t_{11}, t_{12}]$, на котором задается второе корректирующее воздействие; момент времени t_{12} , также как и момент времени t_{11} определяется из задачи пересечения кривой 2 и прямой Δ_k ; для обеспечения требуемой точности обработки опять задается корректирующее воздействие δ_2 , равное Δ_k ;

- после выполнения корректирующего воздействия δ_2 характеристика опять смещается параллельно ординате на величину δ_2 ; в отличие от двух предыдущих

случаев, момент времени t_{13} равен моменту времени t_{20} , т.к. текущая температурная погрешность по кривой 2 не превысила величину Δ .

Таким образом, для первого участка циклограммы была сформирована совокупность следующих параметров:

- число корректирующих воздействий, равное числу интервалов на которые был разделен первый участок циклограммы – «3»;
- интервалы времени $[t_{10}, t_{11}]$, $[t_{11}, t_{12}]$ и $[t_{12}, t_{13}]$, в частности, для данного варианта, в мин – {18,27,15};
- совокупность корректирующих воздействий $\{0, \delta_1, \delta_2\}$ – для рассматриваемого варианта, в мкм – {0,10,10}.

Аналогичным образом получается совокупность параметров для всех остальных участков. Таким образом, алгоритм компенсации температурной погрешности позволил сформировать систему корректирующих воздействий в виде:

$$R = \begin{cases} 3; \{18,27,15\}; \{0,10,10\} \\ 3; \{15,40,5\}; \{0,10,10\} \\ 1; \{60\}; \{0\} \\ 1; \{60\}; \{0\} \\ 1; \{60\}; \{0\} \end{cases} \quad (5.4)$$

Из (5.4) следует, что при спрогнозированном уровне температурной погрешности и заданном показателе точности достаточно задать корректирующие воздействия только на двух первых технологических переходах. При этом температурная погрешность механообработки сократится почти в пять раз.

Для одного перехода – фрезерование паза размером 10h7, схематически результат применения алгоритма коррекции температурной погрешности станка представлен на рисунке 5.26.

Тепловая характеристика без внесения коррекции температурной погрешности индексирована 1. Величина достигаемой в этом случае температурной погрешности Δ_T . Допуск на размер – Δ . Конечная тепловая характеристика с уче-

161

Заключение

В работе «Управление исполнительными органами станка на основе прогнозирования тепловых характеристик» разработаны математическое, алгоритмическое, программное и методическое обеспечение для автоматизированной системы управления исполнительными органами станка, позволяющее компенсировать его температурную погрешность.

1 Разработана методика проведения натурных экспериментов станка, работающего в условиях переменных тепловых режимов.

2 Представлены результаты натурных испытаний в виде тепловых характеристик: температурных характеристик и характеристик температурных перемещений. Исследования проводились в различное суточное и сезонное время, при диапазоне начальных температур станка от 13 °С до 28 °С. Длительность каждого испытания составляла от 300 до 480 минут, суммарная продолжительность испытаний превысила 200 часов. Максимальный разброс экспериментальных данных для температур составил $\pm 0,5$ °С, а для перемещений ± 5 мкм.

3 Экспериментально выявлены закономерности изменения тепловых характеристик станка высокой точности Deckel FP3 на различных режимах его работы:

- Анализ характеристик «температурные перемещения - температура» показывает, что для различных режимов работы станка может фиксироваться одно и то же значение температуры; однако при этом фиксируются различные температурные перемещения (рисунок 2.27). Это означает, что только по показаниям термодатчика, без знания циклограммы работы станка, невозможно реализовать адекватный прогноз температурных перемещений.

- Механизм формирования тепловых характеристик станка для различных циклограмм его работы показал, что все многообразие циклограмм описывается комбинацией трех базовых типов: дискретное повышение частоты вращения шпинделя (рисунок 6.1); повторно-кратковременный тип работы станка (рисунок 6.2) и дискретное понижение частоты вращения шпинделя (рисунок 6.3).

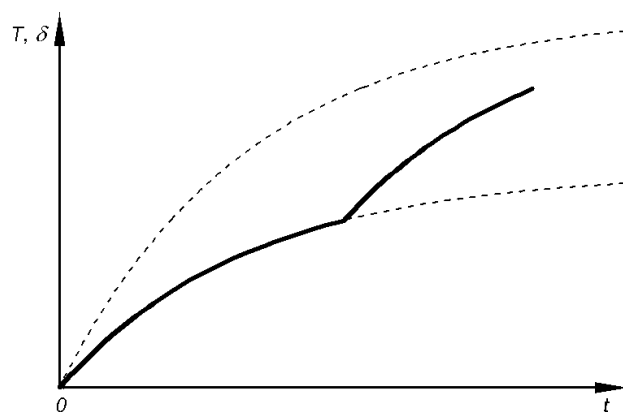


Рисунок 6.1 - Дискретное повышение частоты вращения шпинделя
(условие: $n_{i+1} > n$)

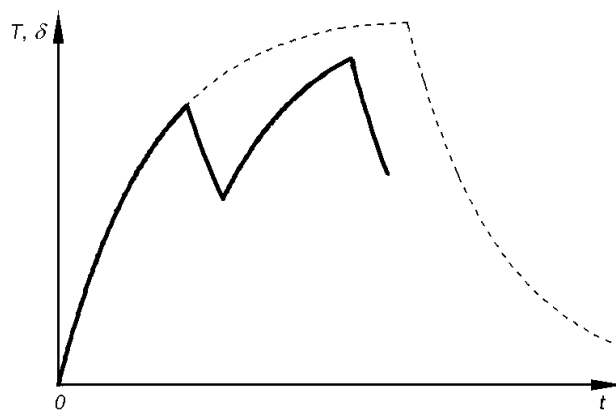


Рисунок 6.2 - Повторно-кратковременный тип работы станка
(условие: $n, 0, n, \dots$)

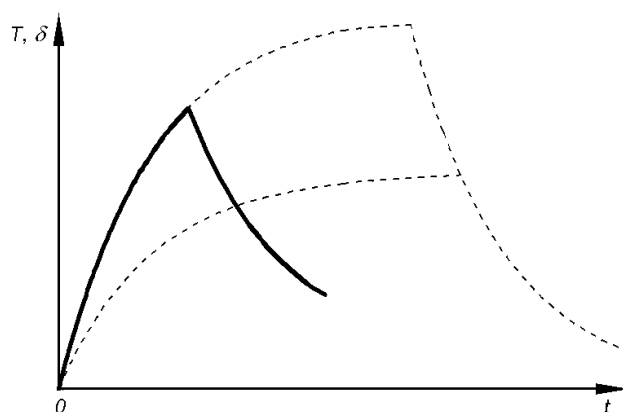


Рисунок 6.3 - Дискретное понижение частоты вращения шпинделя
(условие: $n_{i+1} < n$)

- Особенностью построения участка остывания тепловой характеристики является выбор положения копируемого участка на экспериментальной кривой остывания (рисунок 6.4).

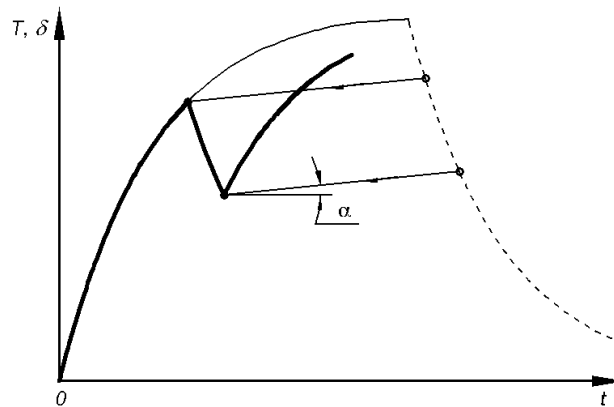


Рисунок 6.4 - Положение копируемого участка остывания

4 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.

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

6 Экспериментально установлено, что погрешность прогнозирования характеристик температурных перемещений по координате, соответствующей оси шпинделя, не превышает 10 %.

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

Список использованных источников

- 1 Адаптивное управление станками / под ред. Б. С. Балакшина. - М.: Машиностроение, 1973. - 688 с.
- 2 Алферов, В. И. Исследование и расчет температурных полей и температурных деформаций прецизионных металлорежущих станков от колебаний воздуха и от внутренних источников тепла: дис. ... канд. техн. наук / В. И. Алферов. - М.: ЭНИМС, 1968. - 168 с.
- 3 Алферов, В. И. Теплостойкость металлорежущих станков / В. И. Алферов // СТИН. - 2004. - №7. - С. 16-19.
- 4 Алферов, В. И. Температура, время и скорость охлаждения деталей станков в заводских помещениях / В. И. Алферов // СТИН. - 2005. - №2. - С. 17-20.
- 5 Алферов, В. И. Расчет теплостойкости при проектировании металлорежущих станков / В. И. Алферов // СТИН. - 2006. - №4. - С. 7-12.
- 6 Алферов, В. И. Температурные поля, деформации и теплоустойчивость систем СПИД и металлорежущих станков / В. И. Алферов // Справочник. Инженерный журнал. - 2006. - №8. - С.26-31., - №9. - С.18-22., - №10. - С. 11-15.
- 7 Бабичев, А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1231 с.
- 8 Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. - М.: Компьютер-Пресс, 2002. - 224 с.
- 9 Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. - М.: ДМК Пресс, 2005. - 640 с.
- 10 Бельзецкий, А. И. Алгоритм оценки влияния теплового режима на точность металлорежущих станков на стадии проектирования / А. И. Бельзецкий // Известия вузов. Машиностроение. - 1987. - №2. - С. 120-126.
- 11 Бельзецкий, А. И. Оценка температурных полей металлорежущих станков на стадии проектирования / А. И. Бельзецкий // Известия вузов. Машиностроение. - 1987. - №7. - С. 132-137.

12 Бромберг, Б. М. Температурные деформации отделочно-расточного станка / Б. М. Бромберг, Г. М. Гольдрайх, В. К. Карпов // Станки и инструменты. - 1970. - №12. - С. 8-10.

13 Воронцов, А. П. Влияние тепловых деформаций на технологическую надежность токарно-револьверных станков / А. П. Воронцов, Х. Е. Мурзаков // Станки и инструмент. - 1982. - №10. - С. 5.

14 Гельфельд, О. М. Влияние тепловыделения в круглошлифовальном станке на точность его работы / О. М. Гельфельд // Станки и инструмент. - 1961. - №12. - С. 16-18.

15 Гиловой, Л. Я. Влияние стыков на тепловое состояние станка: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. Я. Гиловой. - М.: СТАНКИН - 1997. - 18 с.

16 Гиловой, Л. Я. Влияние тонких теплоизолирующих прокладок и стыков на температурное поле станка / Л. Я. Гиловой, В. В. Молодцов // СТИН. - 2004. - №4. - С. 15-18.

17 Гиловой, Л. Я. Моделирование теплопроводности стыков в металлорежущих станках / Л. Я. Гиловой, В. В. Молодцов // СТИН. - 2004. - №5. - С. 8-12.

18 Детали и механизмы металлорежущих станков: в 2 т. / под ред. Д. Н. Решетова. - М.: Машиностроение, 1972. Т.1. - 664 с.; Т.2. - 520 с.

19 Измеритель температуры многоканальный МИТ-12: руководство по эксплуатации ДДШ 2.821. 155 РЭ / ОАО НПП «Эталон». - Омск: [б.и.], 2004. - 61 с.

20 Зверев, И. А. Автоматизированные расчеты шпиндельных узлов / И. А. Зверев, Е. И. Самохвалов, З. М. Левина // Станки и инструмент. - 1984. - №2. - С. 11-15.

21 Исполов, Ю. Г. Новые методы численного интегрирования уравнений связанной задачи термоупругости / Ю. Г. Исполов, Е. А. Постоялкина, Н. Н. Шабров // Электронный журнал.: Дифференциальные уравнения и процессы управления. - С.-Петербург.: Санкт-Петербургский государственный технический университет, - 1998. - № 3 - С. 1-17.

22 Каменев, С. В. Программа для моделирования тепловых характеристик металлорежущих станков «Heat_Mod» / С. В. Каменев, К. В. Марусич // Свидетельство

о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - № 2011618397 от 25.10.2011 - М.: Роспатент, 2011.

23 Каменев, С. В. Программа для термодформационного моделирования несущей системы станка: свидетельство о регистрации программного средства № 50201150731 / С. В. Каменев, К. В. Марусич. - Москва: ВНТИЦ, 2011. - 49158 кбайт.

24 Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: практ. руководство / А. Б. Каплун. - 2-е изд., испр. - М.: Едиториал УРСС, 2004. - 272 с.

25 Коваленко, А. Д. Введение в термоупругость / А. Д. Коваленко. - Киев.: Наукова Думка, 1965. - 204 с.

26 Косилова, А. Г. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, М. А. Калинин. - М.: Машиностроение, 1976. - 288 с.

27 Кравцов, А. Г. Автоматизация тепловых испытаний металлорежущих станков на основе экспериментального модального анализа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / А. Г. Кравцов. - Оренбург: ОГУ, 2006. - 236 с.

28 Круглов, В. И. Обработка высокоточных отверстий на отделочно-расточных станках / В. И. Круглов // Станки и инструмент. - 1979. - №11. - С. 28-31.

29 Кузнецов, А. П. Методы оценки тепловых деформаций металлорежущих станков и пути их снижения / А. П. Кузнецов. - М.: НИИМАШ, 1983. - 68 с.

30 Левина, З. М. Комплекс программы для проверочных расчетов рабочих характеристик шпиндельных узлов / З. М. Левина, И. А. Зверев, Е. И. Самохвалов // в сб.: Автоматизированное проектирование и технологическая подготовка производства в станкостроении. - М.: ЭНИМС. - 1985. - С. 35-46.

31 Лурье, М. З. Исследование температурных деформаций координатно-расточных станков: дис. ... канд. техн. наук / М. З. Лурье. - М.: ЭНИМС. 1965. - 195 с.

32 Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.

33 Марцинкявичюс, А.-Г. Ю. Снижение тепловых деформаций круглошлифовального станка/ А.-Г. Ю. Марцинкявичюс // Станки и инструмент. - 1991. - №5. -

С. 7-10.

34 Марусич, К. В. Автоматизация тепловых исследований металлорежущих станков в режиме реального времени / К. В. Марусич, А. Н. Гончаров // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике: Материалы VI всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). - Оренбург, 2007. - С. 380-382.

35 Марусич, К. В. Многоканальный измеритель температуры МИТ-12ТП-11: методические указания для выполнения лабораторной работы / К. В. Марусич. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. - 45 с.

36 Марусич, К. В. Исследование теплового состояния металлорежущего станка в режиме реального времени / К. В. Марусич // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2008. - №2(82). - С. 232.

37 Марусич, К. В. Использование цифрового измерительного прибора температуры в тепловом испытании станка Deckel FP3 / К.В. Марусич // Матер. VIII всерос. науч.-прак. конф. (с междунар. уч.) «Соврем. информац. технологии. в науке, образ. и практ.». - Оренб.: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. - С. 279-281.

38 Марусич, К. В. Исследование термдеформационного состояния металлорежущего станка : Испытания, тепловые характеристики и закономерности / К. В. Марусич. - Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. - 90 с.

39 Марусич, К. В. Исследование тепловых деформаций фрезерно-сверлильного станка / К. В. Марусич // Реинжиниринг технологических, организационных и управленческих процессов как основа модернизации экономики регионов: материалы всероссийской науч.-прак. конф. - Кострома, КГУ им. Н.А. Некрасова, 2010. - С. 126-130.

40 Марусич, К. В. Прогноз температурных перемещений станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов / К. В. Марусич // Обработка металлов. - 2011. - №4. - С. 74-77.

41 Марусич, К. В. Разработка автоматизированной системы прогнозирования термдеформационного состояния технологического оборудования / К. В. Марусич // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010).

Труды Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Самара: Изд-во СамГАУ, 2010. - С. 239-241.

42 Марусич, К. В. Управление термдеформационным состоянием станка на основе автоматизации прогнозирования температурных перемещений исполнительных органов : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / К. В. Марусич; Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Оренбург. гос. ун-т". - Оренбург, 2012. - 242 с.

43 Марусич, К. В. Использование CAE-системы при моделировании термдеформационного состояния станка / К. В. Марусич // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Орск: Издательство ОГТИ, 2011. - С. 183.

44 Марусич, К. В. Прогнозирование тепловых характеристик станков в условиях переменных режимов работы / К. В. Марусич // Современные вопросы науки – XXI век: Сб. науч. тр. по материалам VII междунар. науч.-практ. конф. - Тамбов: Изд-во Тамбовского областного института повышения квалификации работников образования, 2011. - Вып. 7. - Ч. 1. - С. 90-91.

45 Марусич, К. В. Алгоритм компенсации температурной погрешности станка: материалы международной научно-практической конференции «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны» / К. В. Марусич, А. Н. Поляков, А. Н. Гончаров. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2011. - 2 ч. - С. 184-186.

46 Марусич, К. В. Прогнозирование термдеформационного состояния станка: материалы 2-й международной научно-практической конференции «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях». - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011. - С. 251-255.

47 Марусич, К. В. Прогноз температурных перемещений станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов: сб. тр. Всероссийской молодежной конференции «Машиностроение – традиции и инновации». - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - С. 245-250.

48 Марусич, К. В. Программное средство для прогноза термдеформационного состояния станка: материалы Всероссийской молодежной конференции «Автомати-

зация и информационные технологии (АИТ-2011)». - М.: МГТУ «СТАНКИН», - Т.1. - 2011. - С. 239-242.

49 Марусич, К. В. Автоматизированная система прогнозирования тепловых характеристик станков: Управление, информация и оптимизация: материалы Всероссийской научной школы. - Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. - С. 221-222.

50 Матвеев, С. Е. Пути снижения влияния температурного поля на работу плоскошлифовального станка с крестовым столом и горизонтальным шпинделем высокой точности модели 3Е711ВФ1 / С. Е. Матвеев, Б. А. Миронов // НИИМАШ. Экспресс-информация “Металлорежущие станки и автоматические линии”. - М.: - 1980. - №7. - С. 1-6.

51 Metallurezhushie stanoki: uchebnik dlya mashinostroitelnykh vuzov / pod red. V. Э. Пуша. М.: Машиностроение, 1985. - 256 с.

52 Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. 2-е изд. - М.: Энергия, 1977. - 344 с.

53 Морозов, Е. М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. - М.: Ленанд, 2008. - 456 с.

54 Никитина, И. П. Повышение точности двусторонних торцешлифовальных станков за счет улучшения температурных характеристик: дис. ... канд. техн. наук. / И. П. Никитина. - М.: Мосстанкин, 1992. - 154 с.

55 Никитина, И. П. Тепловые деформации двусторонних торцешлифовальных станков / И. П. Никитина, С. С. Шахновский // Станки и инструмент. - 1992. - №7. - С. 14-16.

56 Никитина, Л. Г. Снижение тепловых деформаций мотор-шпинделей / Л. Г. Никитина, А. П. Сегидя // Станки и инструмент. - 1993. - №6. - С. 8-11.

57 Опитц, Н. Современная техника производства / состояние и тенденции / Н. Опитц. - М.: Машиностроение, 1975. - 280 с.

58 Пестунов, В. М. Тепловая адаптация элементов металлорежущих станков / В. М. Пестунов // СТИН. - 1997. - №12. - С. 29-32.

59 Петров, В. Б. Численное решение задач стационарной и нестационарной теплопроводности для пространственных пластинчато-стержневых систем /

В. Б. Петров, А. С. Сайманин // Расчеты на прочность. М.: Машиностроение, 1989. - Вып. 29. - С. 79-87.

60 Пивовар, Л. Е. Влияние тепловых деформаций на точность токарных многошпиндельных автоматов / Л. Е. Пивовар // Известия Вузов. Машиностроение. - 1982. - №4. - С. 147-149.

61 Пивовар, Л. Е. Влияние тепловых деформаций на работоспособность токарных многошпиндельных автоматов / Л. Е. Пивовар, Б. Я. Киловатый // Станки и инструмент. - 1990. - №6. - С. 12-14.

62 Поляков, А. Н. Разработка метода анализа теплового состояния шпиндельных узлов на основе модального подхода: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Поляков. - М.: Мосстанкин, 1991. - 24 с.

63 Поляков, А. Н. Идентификация тепловых процессов в металлорежущих станках / А. Н. Поляков, И. В. Парфенов // Вестник машиностроения. - 1995. - №2. - С. 19-22.

64 Поляков, А. Н. Применение термоупругой модели к анализу тепловых процессов в металлорежущих станках / А. Н. Поляков, И. П. Никитина // Вестник машиностроения. - 1996. - №7. - С. 27-30.

65 Поляков, А. Н. Экспериментальное исследование термодинамического состояния многоцелевого станка / А. Н. Поляков, А. А. Терентьев // Техника машиностроения. - 2001. - №3. - С. 72-78.

66 Поляков, А. Н. Анализ эффективности применения призматических конечных элементов в тепловой модели станка / А. Н. Поляков // Техника машиностроения. - 2001. - №4. - С. 73-80.

67 Поляков, А. Н. Анализ эффективности построения термоупругой модели плоскошлифовального станка / А. Н. Поляков // Техника машиностроения. - 2001. - №6. - С. 24-30.

68 Поляков, А. Н. Прогнозирование температурных характеристик станка в процессе тепловых испытаний / А. Н. Поляков // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2001. - №12. - С. 33-38.

69 Поляков, А. Н. Методика сокращенных тепловых испытаний металлоре-

жущих станков / А. Н. Поляков // Техника машиностроения. - 2002. - №1. - С. 4-10.

70 Поляков, А. Н. Анализ эффективности параметрической оптимизации тепловой модели станка / А. Н. Поляков, И. В. Парфенов // Известия вузов. Машиностроение. - 2002. - №6. - С. 60-70.

71 Поляков, А. Н. Сокращенные тепловые испытания станков / А. Н. Поляков // СТИН. - 2002. - №8. - С. 15-19.

72 Поляков, А. Н. Графоаналитический метод построения прогнозных тепловых характеристик станков: Материалы всероссийской молодежной конференции «Инновационные технологии в машиностроении (ИТМ-2011)» / А. Н. Поляков, К. В. Марусич. - М.: МГТУ «СТАНКИН», 2011. - С. 228-234.

73 Поляков, А. Н. Идентификация термодинамической системы координатно-расточного станка / А. Н. Поляков // Технология машиностроения. - 2003. - №4. - С. 12-18.

74 Поляков, А. Н. Оптимизация термодинамической системы плоскошлифовального станка ШПХ 32.11 / А. Н. Поляков // Технология машиностроения. - 2003. - №5. - С. 18-25.

75 Поляков, А. Н. Прогнозирование теплоустойчивости станков с помощью нейросетевого подхода / А. Н. Поляков, П. И. Дьяконов // Технология машиностроения. - 2003. - №6. - С. 29-33.

76 Поляков, А. Н. Компьютерные исследования тепловых деформаций металлорежущих станков. Методы, модели и алгоритмы: учебное пособие / А. Н. Поляков. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. - 382 с.

77 Поляков, А. Н. Автоматизированная система поиска и принятия решений по обеспечению теплоустойчивости металлорежущих станков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. / А. Н. Поляков. - Оренбург, 2004. - 33 с.

78 Поляков, А. Н. Автоматизированная система диагностирования термодформационного состояния станков / А. Н. Поляков, А. Г. Кравцов // Машиностроение и инженерное образование. - 2005. - №4. - С. 42-51.

79 Поляков, А. Н. Прогнозирование тепловых деформаций станка с помощью нейронных сетей / А. Н. Поляков, П. И. Дьяконов // Технология машиностроения. - 2005. - №7. - С. 15-19.

80 Поляков, А. Н. Прогнозирование тепловых характеристик станка в условиях непрерывной работы / А. Н. Поляков, А. Г. Кравцов // Вестник машиностроения. - 2005. - №10. - С. 43-49.

81 Поляков, А. Н. Прогнозирование тепловых перемещений в станке методом “ближайших соседей” / А. Н. Поляков, П. И. Дьяконов // СТИН. - 2006. - №7. - С. 13-16.

82 Поляков, А. Н. Исследование теплового состояния станков с помощью нейронных сетей / А. Н. Поляков, П. И. Дьяконов // СТИН. - 2006. - №10. - С. 10-11.

83 Поляков, А. Н. Повышение точности прогнозирования тепловых характеристик при сокращенных испытаниях металлорежущих станков / А. Н. Поляков, А. И. Сердюк, А. Г. Кравцов // Техника машиностроения. - 2007. - №2. - С. 2-9.

84 Поляков, А. Н. Тепловые испытания металлорежущих станков с использованием методов экспериментального модального анализа: учебное пособие для вузов / А. Н. Поляков, А. Г. Кравцов, И. В. Парфенов. - Оренбург: ОГУ, 2008. - 241 с.

85 Поляков, А. Н. Оценивание температурных характеристик станков с использованием производных высшего порядка / А. Н. Поляков, И. В. Парфенов, К. В. Марусич, А. Н. Гончаров // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии./ Сборник материалов четвертой Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. - С. 391-397.

86 Поляков, А. Н. Исследование термдеформационного состояния фрезерно-сверлильного станка с использованием экспериментального модального анализа / А. Н. Поляков, К. В. Марусич, А. Н. Гончаров // Инновации в машиностроении: материалы Международной научно-практической конференции 7-9 октября 2010 / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова, БТИ. - Бийск: Издательство Алт. гос. техн. ун-та, 2010. - С. 272-274.

87 Поляков, А. Н. Исследование закономерностей экспериментальных тепловых характеристик в металлорежущих станках: Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации [электронный ресурс] : Материалы международной науч-

ной конференции, посвященной 55-летию Оренбургского государственного университета / А. Н. Поляков, К. В. Марусич, А. Н. Гончаров. - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. - 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).

88 Поляков, А. Н. Моделирование термдеформационного состояния станков в условиях переменных режимов работы / А. Н. Поляков, И. В. Парфенов, К. В. Марусич, С. В. Каменев // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике. Материалы IX всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. - С. 220-226.

89 Поляков, А. Н. Исследование термдеформационного состояния станка в условиях переменных режимов работы с использованием САЕ-системы ANSYS / А. Н. Поляков, К. В. Марусич, С. В. Каменев // Современные проблемы информатизации в моделировании и социальных технологиях: Сб. трудов. Вып. 16 / Под ред. д.т.н., проф. О.Я. Кравца. - Воронеж: "Научная книга", 2011. - С. 270-273.

90 Поляков, А. Н. Исследование тепловых деформаций в металлорежущих станках / А. Н. Поляков, А. Н. Гончаров, К. В. Марусич // Технология машиностроения. - 2011. - №2. - С. 16-22.

91 Поляков, А. Н. Использование САЕ-системы ANSYS для моделирования элементов несущей системы станка в условиях переменного теплового режима работы / А. Н. Поляков, К. В. Марусич, С. В. Каменев // «Актуальные проблемы реализации образовательных стандартов нового поколения в условиях университетского комплекса». Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ, 2011. - С. 1290-1294.

92 Поляков, А. Н. Метод прогнозирования тепловых характеристик станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов / А. Н. Поляков, К. В. Марусич // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы Всероссийской научно-практической конференции. - Орск: Издательство ОГТИ, 2011. - С. 186-189.

93 Поляков, А. Н. Исследование термдеформационного состояния металлорежущего станка в условиях переменных тепловых режимов работы / А. Н. Поляков,

К. В. Марусич, С. В. Каменев // Справочник. Инженерный журнал. - 2011. - №11. - С. 45-53.

94 Поляков, А. Н. Программное средство для прогнозирования тепловых характеристик станков: сб. научн. тр. по мат-лам Междунар. научн.-практ. конф. «Современные вопросы науки –XXI век» / А. Н. Поляков, К. В. Марусич. - Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2011. - С. 100-101.

95 Поляков, А. Н. Программа для прогнозирования тепловых характеристик станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов «PROGNOZ 2» / А. Н. Поляков, К. В. Марусич // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. - № 2011618214 от 19.10.2011 - М.: Роспатент, 2011.

96 Поляков, А. Н. PROGNOZ – прогнозирование тепловых характеристик станков: свидетельство о регистрации программного средства № 50201100099 / А. Н. Поляков, К. В. Марусич. - Москва: ВНИИЦ, 2011. - 992 кбайт.

97 Поляков, А. Н. Управление температурной погрешностью станков на основе прогнозирования их тепловых характеристик / А. Н. Поляков, К. В. Марусич // Компьютерная интеграция производства и ИПИИ-технологии / Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. - Оренбург: ИП Осиночкин Я.В., 2011. - С. 530-540.

98 Программа обслуживания МИТ-12. Версия 1.03. [Электронный ресурс] / ОАО НПП «Эталон». - Омск: 2004. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

99 Проников, А. С. Диагностика теплового состояния подвижных рабочих органов металлорежущих станков / А. С. Проников, С. А. Дальский, В. Б. Самойлов // в сб.: Техническая диагностика станков и машин. Хабаровск, 1982. - С. 3-8.

100 Проников, А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков / А. С. Проников. - М.: Машиностроение, 1985. - 288 с.

101 Проников, А. С. Испытания станков программным методом в испытательно-диагностическом центре / А. С. Проников, В. Л. Исаченко, Ю. С. Аполлонов, Б. М. Дмитриев // Станки и инструмент. - 1990. - №9. - С. 8-12.

102 Проников, А. С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник: в 3 т. / под общ. ред. А. С. Проникова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, - Т.1. - 1994. - 444 с; - Т.2. - Ч.1. - 1995. - 371 с.

103 Пуш, А. В. Прогнозирование тепловых смещений шпиндельных узлов / А. В. Пуш // Станки и инструмент. - 1985. - №5. - С. 15-19.

104 Пуш, А. В. Испытательно-диагностический комплекс для оценки качества и надежности станков / А. В. Пуш, А. В. Ежков, С. Н. Иванников // Станки и инструмент. - 1987. - №9. - С. 8-12.

105 Пуш, А. В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность / А. В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. - 288 с.

106 Пуш, А. В. Проектирование шпиндельных узлов на опорах качения с заданными показателями работоспособности / А. В. Пуш, И. А. Зверев // СТИН. - 1999. - №9. - С. 9-13.

107 Пуш, А. В. Шпиндельные узлы. Проектирование и исследование: монография / А. В. Пуш, И. А. Зверев. - М.: Издательство «Станкин», 2000. - 197 с.

108 Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / под общ. ред. В. И. Мяченкова. - М.: Машиностроение, 1989. - 520 с.

109 Рейбах, С. Ю. Тепловые деформации электроэрозионных вырезных станков / С. Ю. Рейбах, А. П. Сегида // Станки и инструмент. - 1989. - №4. - С. 28-29.

110 Решетов, Д. Н. Исследование влияния тепловых деформаций на точность и производительность станков / Д. Н. Решетов, В. Ф. Смирнов, Ю. Н. Соколов. - М.: МАТИ-ЭНИМС, 1950. - 47 с.

111 Решетов, Д. Н. Повышение точности металлорежущих станков / Д. Н. Решетов. - М.: НИИМАШ, 1979. - 110 с.

112 Сайманин, А. С. Совершенствование несущих систем токарных автоматов с ЧПУ на основе обобщенной конечно-элементной математической модели: дис. канд. ... техн. наук / А. С. Сайманин. - М.: Мосстанкин, 1986. - 189 с.

113 Самохвалов, Е. И. Температурный анализ шпиндельных узлов токарных станков средних размеров / Е. И. Самохвалов, З. М. Левина // Станки и инструмент. - 1985. - №11. - С. 17-19.

114 Самохвалов, Е. И. Повышение быстроходности шпиндельных узлов на основе автоматизированных расчетов по температурному критерию: дис. ... канд. техн. наук / Е. И. Самохвалов. - М.: Мосстанкин, 1986. - 274 с.

115 Самохвалов, Е. И. Температурный анализ высокоскоростных шпиндельных узлов / Е. И. Самохвалов // Станки и инструмент. - 1989. - №4. - С. 8-10.

116 Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. - М.: Машиностроение, 1979. - 392 с.

117 Сегида, А. П. Расчет стационарных температурных полей металлорежущих станков / А. П. Сегида // Вестник машиностроения. - 1982. - №9. - С. 37-41.

118 Сегида, А. П. Расчет температурных полей и тепловых деформаций шпиндельных узлов / А. П. Сегида // Станки и инструмент. - 1984. - №2. - С. 23-25.

119 Сегида, А. П. Расчет и исследование температурных полей и температурных деформаций металлорежущих станков: дис. ... канд. техн. наук / А. П. Сегида. - М.: ЭНИМС, 1984. - 196 с.

120 Смирнов, В. Э. Влияние тепловых деформаций на точность металлорежущих станков / В. Э. Смирнов, Д. Н. Решетов // Станки и инструмент. - 1952. - №1. - С. 5-11.

121 Соколов, А. А. Исследование влияния отклонений от соосности на теплообразование и температурные деформации шпиндельных узлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Соколов. - М.: МВТУ, 1972. - 19 с.

122 Соколов, Ю. Н. Температурные расчеты в станкостроении.- 2е изд. / Ю. Н. Соколов. - М.: Машиностроение, 1968. - 77 с.

123 Соколов, Ю. Н. Расчет температурных полей и температурных деформаций металлорежущих станков / Ю. Н. Соколов. - М.: ЭНИМС, 1958. - 83 с.

124 Соколов, Ю. Н. Тепловые деформации металлорежущих станков / Ю. Н. Соколов // СТИН. - 2003. - №10. - С. 18-20.

125 Стародубов, В. С. Влияние тепловых деформаций станков с ЧПУ на точность обработки / В. С. Стародубов, А. П. Кузнецов // Машиностроитель. - 1979. - №3. - С. 19-21.

126 Стародубов, В. С. Температурные деформации и характер их влияния на точность металлорежущих станков с ЧПУ / В. С. Стародубов // Справочник. Инженерный журнал. - 2007. - №4. - С. 29-40.

127 Стародубов, В. С. Способы снижения тепловыделений и температурных деформаций в металлорежущих станках с ЧПУ / В. С. Стародубов // Справочник. Инженерный журнал. - 2007. - №5. - С. 32-39.

128 Стародубов, В. С. Способы коррекции относительных линейных и угловых смещений рабочих органов станка вследствие температурных деформаций / В. С. Стародубов // Справочник. Инженерный журнал. - 2007. - №6. - С. 36-44.

129 Стародубов, В. С. Отвод теплоты охлаждением деталей и узлов станка и масла в гидросистеме для снижения температурных деформаций / В. С. Стародубов // Справочник. Инженерный журнал. - 2007. - №7. - С. 39-46.

130 Стародубов, В. С. Подвод теплоты к деталям и узлам станка для быстрой стабилизации температуры нагрева и их температурных деформаций / В. С. Стародубов // Справочник. Инженерный журнал. - 2007. - №8. - С. 49-52.

131 Стародубов, В. С. Температурные деформации станков с ЧПУ, способы их снижения и коррекции / В. С. Стародубов // Вестник машиностроения. - 2008. - №2. - С. 48-53.

132 Схиртладзе, А. Г. Стандартизация и сертификационные испытания техники / А. Г. Схиртладзе, В. В. Юркевич // Технология машиностроения. - 2005. - №11. - С. 66-67.

133 Типовые методики и программы испытаний металлорежущих станков: методические рекомендации. - М.: ЭНИМС, 1984. - 172 с.

134 Титов, А. С. Анализ тепловых деформаций в токарно-карусельных станках с гидростатическими направляющими планшайбы / А. С. Титов, С. Н. Шатохин, Л. П. Шатохина // СТИН. - 2004. - №7. - С. 13-16.

- 135 Третьяк, Л. Н. Повышение быстроходности охлаждаемых шпиндельных узлов с опорами качения на основе моделирования тепловых процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л. Н. Третьяк - М.: Мосстанкин, 1990. - 16 с.
- 136 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.
- 137 Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А. В. Чигарев. - М.: Машиностроение-1, 2004. - 512 с.
- 138 Шаталова, М. М. Выбор основных размеров шпиндельных узлов с помощью ЭВМ при эскизном проектировании / М. М. Шаталова // Станки и инструмент. - 1984. - №2. - С. 9-11.
- 139 Шахновский, С. С. Баланс тепловых потоков в торцешлифовальном станке / С. С. Шахновский // Станки и инструмент. - 1989. - №6. - С. 13-15.
- 140 Шевчук, С. А. Материалы для станкостроения и технология формирования их эксплуатационных свойств / С. А. Шевчук // СТИН. - 1996. - №1. - С. 15-19., - №2. - С. 23-26., - №3. - С. 9-14., - №4. - С. 19-23.
- 141 Ши, Д. Численные методы в задачах теплообмена. - М.: Мир, 1988. - 544 с.
- 142 Юрин, В. Н. Шпиндельные узлы с тепловыми трубами / В. Н. Юрин // Станки и инструмент. - 1981. - №4. - С. 16-18.
- 143 Юрин, В. Н. Повышение технологической надежности станков / В. Н. Юрин. - М.: Машиностроение, 1981. - 78 с.
- 144 Юркевич, В. В. Тепловые процессы в токарном станке мод. МК-3002 / В. В. Юркевич // Вестник машиностроения. - 2000. - №1. - С. 46-49.
- 145 Юркевич, В. В. Точность токарного станка при изменении теплового состояния / В. В. Юркевич // Техника машиностроения. - 2000. - №3. - С. 57-59.
- 146 Юркевич, В. В. Прогнозирование точности изготовления деталей / В. В. Юркевич // Техника машиностроения. - 2000. - №4. - С. 46-52.
- 147 Юркевич, В. В. Испытания, контроль и диагностика технологических систем: учеб. пособие / В. В. Юркевич. - М.: МГТУ «СТАНКИН», 2005. - 360 с.

148 Юркевич, В. В. Исследование точности сверления отверстий на фрезерном станке УФ-280 / В. В. Юркевич // Вестник машиностроения. - 2006. - №2. - С. 50-54.

149 Юркевич, В. В. Контроль и диагностика технологического оборудования: учеб. пособие / В. В. Юркевич, А. Г. Схиртладзе, И. А. Коротков. - Подольск: Сатурн-С, 2006. - 448 с.

150 Юркевич, В. В. Методы испытаний обрабатывающих станков / В. В. Юркевич // Машиностроитель. - 2006. - №8. - С. 27-36., - №10. - С. 30-39., - №12. - С. 10-13.

151 Юркевич, В. В. Испытания, контроль и диагностика металлообрабатывающих станков: монография / В. В. Юркевич, А. Г. Схиртладзе, В. П. Борискин. - Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. - 552 с.

152 Юркевич, В. В. Контроль точности фрезерной обработки / В. В. Юркевич, М. М. Климанов, Д. Е. Искра // Техника машиностроения. - 2007. - №2. - С. 13-22.

153 Юркевич, В. В. Точность фрезерной обработки / В. В. Юркевич // Вестник машиностроения. - 2008. - №7. - С. 33-37.

154 Ягопольский, А. Г. Перспективные методы испытания металлорежущих станков / А. Г. Ягопольский, В. А. Волохов // Известия вузов. Машиностроение. - 2006. - №4. - С. 44-47.

155 Horejs, O. Compensation of Machine tool thermal Errors based on Transfer functions / O. Horejs, M. Mares, P. Kohut, P. Barta, J. Hornyach // MM Science Journal, Prague, Czech Republic, March, 2010. - P. 162-165.

156 Jin, K. C. Thermal characteristics of the spindle bearing system with a gear located on the bearing span / K. C. Jin, G. L. Dai // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 1998. - № 38. - P. 1017-1030.

157 Kitamura Bridgecenter – 8F – Вертикальный фрезерный центр портального типа – Kitamura – catalog.pdf – Access mode: <http://www.solver.ru/products/isprod/kitamura/Bridgecenter - 8F.asp>, free. – Caption from title screen (access date 31.08.2010 г.).

158 Liu, D. Temperature Field Modeling and Thermal Deformation Analysis of Turning and Milling Machining Center / D. Liu, J.Liu, Y. Su, Y.Wang // International Journal of Advanced Materials Research, vol.189-193, October 2011. - P. 1986-1990.

159 Liu, D. Finite Element Analysis of High-Speed Motorized Spindle Based on ANSYS / D. Liu, H. Zhang, Z. Tao, Y. Su // The Open Mechanical Engineering Journal, - 2011. - vol.5. - P. 1-10.

160 Madenci, E. The finite element method and applications in engineering using ANSYS / E. Madenci, I. Guven. – NY: Springer Science+Business Media, LLC, 2006. - 686 p.

161 Mares, M. Mechatronic approach in modeling, identification and control of thermal deformation of quill / M. Mares, P. Barta // MM Science Journal, Prague, Czech Republic, October, 2008. - P. 25-29.

162 Mayr, J. Compensation of Thermal Effects on Machine Tools using a FDEM Simulation Approach / J. Mayr, M. Ess, S. Weikert, K. Wegener // 9th International Conference and Exhibition on laser metrology, machine tool, CMM and robotic performance, London, United Kingdom, 2009. - P. 1950-1961.

163 Mayr, J. Calculating thermal location and component errors on machine tools / J. Mayr, M. Ess, S. Weikert, K. Wegener // ASPE Annual Meeting, Monterey, CA, USA, 2009. - P. 101-105.

164 Moaveni, S. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS / S. Moaveni. – New Jersey 07458: Prentice hall Inc, Upper Saddle River, 1999.- 527 p.

165 Nicholson D. W. Finite Elements Analysis: Thermomechanics of Solid. – Washington.: CRC Press, 2003. - 268 p.

166 Okuma's Guide to Thermal Control Technology-http://www.okumamerit.com/e_related/report_pdf/tcg/tcg01.html (access date 15.04.2006 г.).

167 R. Ramesh, R. Error compensation in machine tools — a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors / R. Ramesh, M. A. Mannan, A. N. Poo // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2000. - № 40. - P. 1235-1256.

168 Ramesh, R. Error compensation in machine tools — a review. Part II: thermal errors / R. Ramesh, M. A. Mannan, A. N. Poo // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2000. - № 40. - P. 1257-1284.

169 Stolarski, T. A. Engineering analysis with ANSYS software / T. A. Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Oxford: Elsevier, 2006. - 456 p.

170 Tae Jo Ko Particular behavior of spindle thermal deformation by thermal Bending conditions / Tae Jo Ko, Tae-weon Gim b, Jae-yong Ha // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2003. - № 43. - P. 17-23.

171 Thermo – Friendly Concept / OKUMA Only – One Technology / Products / Okuma Corporation – Access mode: <http://www.okuma.co.jp/english/onlyone/thermo/index2.html>, free. – Caption from title screen (access date 31.08.2010 г.).

172 Vanherck, P. Compensation of thermal deformations in machine tools with neural nets / P. Vanherck, J. Dehaes, M. Nuttin // Computers in Industry. - 1997. - № 33. - P. 119-125.

173 Won, S. Y. Thermal error analysis for a CNC lathe feed drive system / S. Y. Won, K. K. Soo, W. C. Dong // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 1999. - № 39. - P. 1087-1101.

174 Wu, C. H. Thermal analysis for the feed drive system of a CNC machine center / C. H. Wu, Y. T. Kung // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2003. - № 43. - P. 1521-1528.