

**Поляков А.Н., Каменев С.В., Дьяконов П.И.**  
Оренбургский государственный университет

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

Статья рассказывает о работах кафедры металлообрабатывающих станков и комплексов Оренбургского государственного университета, выполняемых в рамках научного направления кафедры «Компьютерное моделирование физико-технических процессов в металлорежущих станках». Рассмотрены три основных направления кафедры: исследования в области автоматизированных систем научных исследований; инженерный анализ станков; нейросетевое моделирование тепловых процессов в станках. Сформулированы ряд перспективных направлений развития научных исследований, среди которых: разработка автоматизированной системы модального синтеза термодеформационных систем станков по условиям теплоустойчивости; разработка методологии структурной оптимизации термодеформационной системы станка.

### **Введение**

На кафедре металлообрабатывающих станков и комплексов Оренбургского государственного университета /МСК ОГУ/ в различные периоды ее существования (1984 год – основание кафедры металлорежущих станков и инструментов; с 2002 год – кафедра МСК) с 1993 года начались проводиться работы в области тепловых исследований металлорежущих станков с приоритетным применением компьютерных технологий.

### **Актуальность**

Приоритетным направлением повышения конкурентоспособности станков является улучшение их качества. Важнейшим показателем качества станка выступает его точность. В настоящее время реальными требованиями, предъявляемыми к современным станкам являются: размерная точность обработки до 5 мкм; круглосуточная эксплуатация станка в течение 5 лет; рабочие подачи более 50 м/мин; скорости резания при лезвийной обработке более 2000 м/мин.

Вместе с тем температурные погрешности станка при обработке могут составлять до 100 мкм, что более, чем на порядок, превышает требуемую точность обработки. Поэтому, важнейшим направлением решения данной проблемы является обеспечение теплоустойчивости станков на различных этапах их жизненного цикла.

В условиях компьютерно-интегрированного производства и развития гибких и реконфи-гурируемых производственных систем наиболее эффективным способом обеспечения теплоустойчивости станков являются компьютерные технологии.

### **Автоматизированная система научных исследований**

Температурные погрешности станка вызываются тепловыми деформациями его несущей системы. Величина тепловых деформаций предопределяется совокупностью решений, принимаемых на различных этапах жизненного цикла станка – от маркетинговых исследований до эксплуатации. Требуемая точность станка по величине его тепловых деформаций на различных этапах жизненного цикла определяется совокупностью решений, принимаемых специалистами разных профилей. Современное автоматизированное производство, характеризуемое использованием различного назначения автоматизированных систем, международных стандартов и форматов электронных данных, позволяет связать в единый комплекс решения, принимаемые на различных этапах жизненного цикла станка. Однако, для реализации этого необходима научная система поддержки решений, которая бы позволила количественно оценить их влияние на величину тепловых деформаций станков. Анализ современного уровня развития автоматизации машиностроительного производства показывает, что наиболее эффективным способом повышения конкурентоспособности станков, приводящим к снижению стоимости проектирования, производства и эксплуатации оборудования, является использование новых интеллектуальных технологий, важнейшим компонентом которых являются автоматизированные системы научных исследований /АСНИ/.

В настоящее время на кафедре разработана автоматизированная система поиска и принятия решений по обеспечению теплоустойчивости металлорежущих станков. Система раз-

работана на основе установления связей между конструкторско-технологическими и эксплуатационными параметрами станка, с одной стороны, и выходными показателями его точности, с другой.

Система включает:

- термоупругую модель станка, обеспечивающую формализацию построения идентификационных и оптимизационных моделей;
- модальный подход к прогнозированию теплового состояния несущей системы станка, обеспечивающий получение экспресс-оценки качества математической модели и выявление влияния на тепловую инерционность станка его конструктивно-технологических и эксплуатационных параметров;
- модели и алгоритмы построения редуцированных систем большой размерности, обеспечивающие повышение эффективности расчета нестационарного теплового состояния станка;
- методологию сокращенных тепловых испытаний станков с системной поддержкой на этапах доводки и эксплуатации;
- методологию построения идентификационных и оптимизационных моделей несущих систем станков, используемую при уточнении математической модели станка по результатам натурных тепловых испытаний и при поиске рациональных термодеформационных систем станка.

Реализована инженерная поддержка системы в виде программно-методического комплекса исследований теплового деформирования металлорежущих станков, включающего:

- программно-математические модули: прогнозирования теплового состояния, в том числе с реализацией алгоритмов редуцирования систем большой размерности; расчета тепловых деформаций; уточнения математических моделей по результатам тепловых испытаний; поиска комплектов рациональных проектных, технологических и эксплуатационных решений по обеспечению заданной точности станка;
- методическое обеспечение: методика выбора методов редукции для систем большой размерности; система оценок эффективности реализации термоупругих моделей станков; методика построения расчетных схем станков; методика сокращенных тепловых испытаний станков; методика идентификации термодеформационных систем станков; методика формирования комплектов рациональных проектных, технологических и эксплуатационных решений по обеспечению заданной точности станка;

– информационное обеспечение: экспериментальная информация по термодеформационному состоянию станков различных типов; результаты машинных экспериментов.

### **Инженерный анализ станков**

По мнению экспертов в ближайшие 5 лет на этапе проектирования станков, в сфере механического проектирования, ожидается всплеск заинтересованности к САЕ-системам (системам инженерного анализа), являющихся частью средств управления жизненным циклом изделия. Наиболее известными программными комплексами, используемыми в механическом проектировании, являются Nastran, Ansys, Unigraphics, Catia, Cosmos, Samcef.

На кафедре проводятся исследования по использованию САЕ-систем Nastran, Ansys и Cosmos в комплексном анализе термодеформационного состояния станков.

Несмотря на большие заявленные возможности такого класса систем к инженерным приложениям, реальное их использование в комплексном анализе станков пока недостаточно. Это объясняется тремя главными проблемами: потребностью в специальной подготовке инженеров пользователей; сложностью практической реализации совместного решения задач статики, динамики и теплопроводности; недостатком методического обеспечения.

Перечисленные проблемы определили задачи выполняемых работ в этом направлении: разработка дополнительного препроцессора, снижающего требования к специальным знаниям для пользователей системы Ansys; разработка процессора – комплексного решателя задач статики, динамики и теплопроводности; создание методик: построения геометрических моделей узлов станков; комплексного расчета (статический, динамический, тепловой); идентификации и оптимизации термодеформационных систем станков.

Иллюстрацией решения первой задачи является разработанная Каменевым С.В. на языке Object Pascal программа формирования геометрической модели шпиндельного узла на опорах качения с последующим расчетом в системе Ansys.

На основе расчетной схемы шпинделя, использующей стержневые конечные элементы, с опорами качения, моделируемых пружинными элементами, программа формирует файл-сценария для последующего расчета в системе Ansys.

Использование разработанного препроцессора позволяет на порядок сократить время на подготовку исходных данных.

Корпусные детали несущей системы станков имеют сложную геометрическую форму. Их конечно-элементное представление содержит большое число конечных элементов (сотни тысяч), приводящее к длительности конечно-элементного анализа, измеряемого не одним десятком часов в зависимости от производительности компьютера. Распространенным способом решения этой проблемы является использование поверхностной геометрической модели детали с нанесением сетки оболочковых конечных элементов. В этом случае построение расчетной модели оказывается более трудоемким, но дает значительное сокращение времени расчета. В качестве примера в таблице 1 приведены результаты модального расчета базовых деталей (станина и основание) вертикально-фрезерного станка мод. 6Р11МФ3-1. Расчеты проведены с использованием оболочковых и тетраэдрических твердотельных элементов в четырех CAE-системах: ANSYS, NASTRAN, COSMOS, ALGOR.

Анализ полученных результатов показал: наиболее эффективный решатель реализован в системе Cosmos; применение оболочковых элементов позволяет более чем в семь раз сократить число конечных элементов, используемых в модели; более, чем на порядок сократить время расчета; погрешность вычислений составляет около 5%.

Проведенные исследования позволяют в многовариантных расчетах, в том числе в идентификационных и оптимизационных моделях несущих систем станков, использовать оболочковые элементы.

### **Нейросетевое моделирование станков**

Одной из важнейших проблем на этапах изготовления и эксплуатации станков является реализация систем диагностирования и компенсации температурной погрешности. Одним из способов решения данной проблемы является применение нейросетевых технологий.

На кафедре МСК ОГУ выполнен комплекс работ, направленный на: исследование эффективности прогнозирования тепловых характеристик станков с помощью нейронных сетей; разработаны методы, модели и алгоритмы прогнозирования термодеформационного состояния станков с помощью нейронных сетей. С

Экспериментальные тепловые характеристики представляют собой временной ряд, т. е. ряд температур (температурных перемещений) в последовательные моменты времени. Поэтому прогнозирование тепловых характеристик сводится к типовой задаче нейроанализа – прогнозирование на основе временных рядов.

Оценка эффективности прогнозирования тепловых характеристик станков на основе временных рядов включала анализ следующих факторов на погрешность прогнозирования: тип архитектуры нейронной сети; объем обучающей выборки; режим работы станка – непрерывный и повторно-кратковременный.

Исследована эффективность прогнозирования температурных перемещений на основе сетей трех типов: многослойного персептрона, линейной и радиально-базисной функции.

Экспериментальным путем установлено:

- наибольшие ошибки прогнозирования возникают при использовании сети на радиально-базисных функциях;

Таблица 1. Результаты модального анализа базовых деталей станка

Деталь	CAE-система	Тип конечного элемента	Число степеней свободы	Время расчета, сек.	Собственная частота, Гц				
					1	2	3	4	5
ОСНОВАНИЕ	ANSYS	оболочка (3/4 узла)	25326	10	123	163	197	206	236
		тетраэдр (10 узлов)	180741	196	130	169	192	208	228
	NASTRAN	тетраэдр (10 узлов)	158832	458	130	169	191	208	227
	COSMOS	тетраэдр (10 узлов)	161802	26	129	168	190	206	225
	ALGOR	гексаэдр (6 узлов) + тетраэдр (4 узла)	84978	2868	131	170	190	203	227
СТАНИНА	ANSYS	оболочка (3/4 узла)	27690	13	79	91	150	299	307
		тетраэдр (10 узлов)	274899	493	78	95	158	307	324
	NASTRAN	тетраэдр (10 узлов)	185562	564	79	96	159	308	325
	COSMOS	тетраэдр (10 узлов)	187368	36	80	97	162	312	328
	ALGOR	гексаэдр (6 узлов) + тетраэдр (4 узла)	122814	3811	81	97	163	311	330

- применение линейной сети обеспечивает погрешность прогнозирования в диапазоне от 8 до 60%, но для экспериментальных данных с явно выраженным нелинейным характером прогноз погрешность не предсказуема;
- наименьшие погрешности прогнозирования обеспечивает применение многослойного персептрона с тремя слоями.

Установлено, что возможно получение погрешности прогнозирования в пределах 5% для тепловых характеристик в условиях непрерывной работы станка. Прогнозирование тепловых характеристик станка для повторно-кратковременного режима обеспечивает высокую точность прогнозирования при минимальном числе циклов работы станка, равным двум. Это объясняется тем, что один цикл работы используется для формирования входного вектора, а другой – для обучающей выборки.

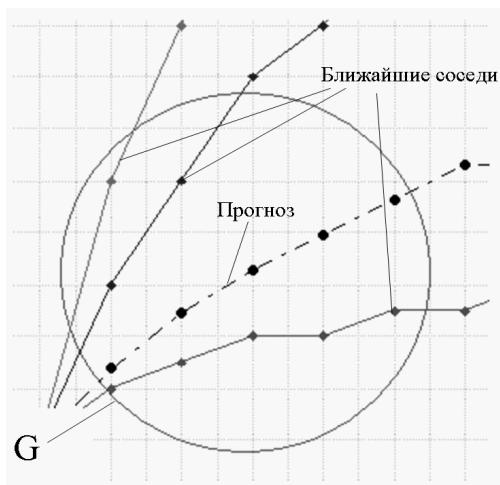


Рисунок 1. Схема прогнозирования с использованием метода ближайших соседей (сплошные линии – ближайшие соседи для пунктирной линии, представляющей прогноз)

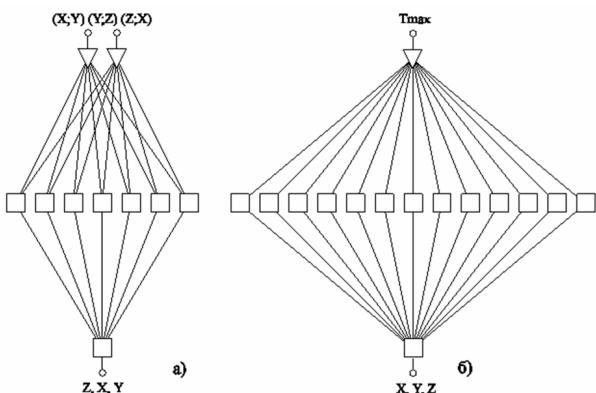


Рисунок 2. Архитектуры нейронных сетей для прогнозирования перемещений

Установлено: при значениях избыточных температур для тепловой характеристики станка в пределах 1-2° С (до 5 мкм для температурных перемещений, соответственно) ошибка прогнозирования существенно возрастает (более 50%).

Реализация нейросетевых технологий в системах ЧПУ для компенсации температурной погрешности станков требует дальнейшего совершенствования методов прогнозирования. Одним из таких методов является метод ближайших соседей. Прогнозирование с использованием метода ближайших соседей предполагает, что в некоторой области  $G$   $n_1$ -мерного фазового пространства поведение сложной системы приближенно описывается маломодовой моделью с  $n_1$ -размерностью –  $n_1 < n$ . Тогда, если данная траектория в течение времени наблюдений достаточно число раз проходила через область  $G$ , то этого может быть достаточно чтобы восстановить  $n_1$ -мерную систему, дающую возможность получить локальный прогноз (рисунок 1).

Для оценки эффективности метода ближайших соседей проводились два вида исследований для непрерывных и повторно-кратковременных режимов работы станков, использованные архитектуры сетей представлены на рисунке 2.

В первом исследовании оценивалась эффективность применения данного метода для прогнозирования температурного перемещения по третьей координате по экспериментальным данным для двух осей. Например, если в качестве входа нейронной сети использовались экспериментальные перемещения по осям Y, Z или по осям X, Y, то выходами рассматривались перемещения вдоль осей X и Z, соответственно, для двух частот вращения шпинделя (рисунок 2 а). Выбор частот вращения определяется необходимостью обеспечения ширины «руслы», в котором прогнозируются значения. Сеть должна иметь максимальные и минимальные значения диапазона прогнозирования, чтобы дать адекватный прогноз в этом диапазоне.

Во втором исследовании оценивалась эффективность применения этого метода для прогнозирования температурных перемещений по экспериментальным данным температуры. Эта задача прогнозирования особенно важна для систем ЧПУ при реализации алгоритмов компенсации температурной погрешности станков. Кроме того, из вычислительных экспериментов ранее было установлено, что использование аппроксимирующих функций для температур и температурных перемещений на основе модального под-

хода нельзя решить данную задачу с высокой точностью. В этом случае в качестве входов сети использовались температуры передней опоры шпиндельного узла на двух предельных частотах вращения. Выходами сети являлись перемещения по координатам X, Y, Z для промежуточной частоты вращения шпинделя (рисунок 2 б). Погрешность прогнозирования не превысила 10%.

Было установлено, что использование метода ближайших соседей позволяет:

- даже при небольшом количестве обучающих примеров получить прогнозирование температурных перемещений с погрешностью менее 10% – для непрерывного режима работы станка и 15-30% – для повторно-кратковременного режима работы;

- гарантировать точность обработки менее 10 мкм за счет компенсации температурных погрешностей станка при их величине до 30 мкм (при реализации алгоритмов температурной компенсации в устройствах ЧПУ станков).

Нейросетевые технологии могут использоваться при создании систем теплового диагностирования станков и любых сложных технических систем. Была решена задача прогнозирования теплового состояния станка в некоторых фиксированных точках на заданный период времени по данным одного температурного датчика с использованием нейронных сетей. В качестве объектов исследований были выбраны плоскошлифовальный станок высокой точности модели ШПХ 32.11 и горизонтально-расточной станок модели 2А613. На данных станках проводилась серия экспериментов с вариацией частот вращения шпинделя и начальных условий работы. Для регистрации температур несущей системы использовались 22 температурных датчика, имеющих в качестве чувствительных элементов кремниевые диоды. Были

построены две архитектуры нейронных сетей. Для станка 2А613 входными данными являлись температуры, полученные с одного датчика, данные для остальных датчиков принимались выходами нейронной сети. Для станка ШПХ 32.11 входами нейронной сети являлись температуры с трех датчиков, а выходами – значения для остальных девятнадцати датчиков.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- максимальные отклонения спрогнозированных температур от экспериментальных не превысили 25%;
- возможна разработка методики тепловых испытаний металлорежущих станков, использующей минимальное число термодатчиков.

### **Перспектива развития исследований**

Таким образом, проводимые на кафедре исследования, позволяют определить ближайшие перспективы использования компьютерных технологий в обеспечении теплоустойчивости станка на различных этапах его жизненного цикла:

- 1) разработка автоматизированной системы комплексного анализа станка;
- 2) разработка автоматизированной системы тепловой диагностики станка на этапах изготовления и эксплуатации;
- 3) разработка автоматизированной системы нейросетевого моделирования термодеформационного состояния станка;
- 4) разработка автоматизированной системы модального синтеза термодеформационных систем станков по условиям теплоустойчивости.
- 5) Разработка методологии структурной оптимизации термодеформационной системы станка.