

Поляков А.Н., д-р техн. наук, проф.,
Парфёнов И.В., канд. техн. наук, доц.
Оренбургский государственный университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СТАНКАХ

На этапе эксплуатации станков с ЧПУ наиболее востребованными являются технологии быстрого моделирования, позволяющие оперативно строить модели, и на основе полученных результатов вносить корректирующие воздействия в работу различных автоматизированных систем, обеспечивающих теплоустойчивость станка. В настоящее время среди исследователей в качестве технологий быстрого моделирования применяют методы имитационного моделирования на основе приложения Simulink среды Matlab. Анализ возможностей интерактивной среды Simulink показал, что тепловая модель станка может быть реализована тремя способами: использованием аналитических решений уравнения теплопроводности; решением системы дифференциальных уравнений встроенными методами Simulink; использованием аппарата передаточных функций. В работе рассмотрен первый из возможных способов построения тепловой модели станка, работающего в условиях переменных тепловых процессов, обусловленных изменяющимися скоростями резания. Особенностью построения тепловых характеристик станка являются условия их согласования на границах, соответствующих сменяющимся частотам вращения шпинделя станка. Особенностью реализации математической модели является использование экспериментального модального анализа. При этом модальные параметры аппроксимирующих функций определялись путем решения задачи оптимизации. Для согласования смежных тепловых характеристик на их границах было принято условие: независимо от количества используемых в модели температурных мод начальный уровень первой моды для следующего режима работы станка принимался равным достигнутому уровню тепловой характеристики станка в последний момент интервала времени текущего режима. Правомерность принятого условия была экспериментально подтверждена малой погрешностью моделирования – менее 5 %. Для практической реализации предложенного подхода представлена новая методика теплового моделирования.

Ключевые слова: тепловые характеристики станка, температурная погрешность, экспериментальный модальный анализ, имитационное моделирование

Введение. Объем выпуска высокоточных деталей в общей номенклатуре готовых изделий современного машиностроительного предприятия неуклонно растет [1]. Анализ тенденций металлообрабатывающих производств показывает, что уже сегодня достижима точность обработки для станков повышенной точности в диапазоне от 1 до 5 мкм. При сохранении текущих тенденций в течение последующих 10–15 лет эксперты прогнозируют для этих же классов точности станков стабильный диапазон точности в пределах от 0,1 до 1 мкм [2].

Высокая точность механообработки неизбежно связана с ростом скоростей резания. Например, при высокоскоростном фрезеровании реализуемая скорость резания при обработке чугуна составляет 50 м/с; при обработке стали – 30 м/с; при обработке алюминиевых сплавов – 100 м/с [3]. Высокие скорости резания сопровождаются большими частотами вращения шпинделя. Для современных обрабатывающих центров типовыми являются частоты вращения шпинделя в диапазоне от 10000 до 30000 об/мин, при которых актуальными становятся вопросы температурной погрешности [4]. В реальных условиях обработки на современных станках с

ЧПУ фактическая температурная погрешность может превышать 60 мкм [4]. Достижение предельной точности обработки реализуемо только за счет минимизации влияния всех возникающих при резании факторов.

Актуальность моделирования тепловых процессов в станках. По мнению экспертов станкостроения, прогресс в обеспечении точности обработки во многом определяется существующими методами моделирования [2]. Эффективность методов моделирования, используемых для оценки точности обработки, базируется на установленных взаимосвязях между конструкторско-технологическими входными параметрами и выходными параметрами точности станка или технологической системы (в широком смысле).

Моделирование осуществляется на различных этапах жизненного цикла станка. Важнейшими являются этапы проектирования, изготовления и эксплуатации. Эффективность созданной конструкции во многом определяется принятыми решениями на ранних этапах проектирования станка. Сегодняшний этап проектирования оптимальных конструкций – это 3D-моделирование и инженерный анализ несущей системы станка [5,

6, 7]. На этапах изготовления и эксплуатации практически для любого станка выявляются недостатки, для ликвидации которых наряду с экспериментальными исследованиями строятся математические и компьютерные модели. На этом этапе принципиальную роль играют методы обработки экспериментальных данных, представленные регрессионным анализом и экспериментальным модальным анализом, а также методы искусственного интеллекта [7–14].

При тепловом моделировании станков приходится решать задачи из различных областей математики и физики. На производстве, в условиях реализации цифровой экономики, актуальной является методология компьютерного моделирования, которая объединяет методы из различных областей знаний, характеризуемых высшей степенью формализации. При этом практика эксплуатации оборудования показывает, что на этом этапе наиболее востребованными являются технологии быстрого моделирования, позволяющие оперативно строить модели, и на основе полученных результатов вносить корректирующие воздействия в работу различных автоматизированных систем, обеспечивающих теплоустойчивость станка.

В качестве таких технологий быстрого моделирования большую популярность среди исследователей в области теплового моделирования начинают набирать методы имитационного моделирования на основе приложения Simulink среды Matlab [15, 16].

Метод моделирования. Анализ возможностей интерактивной среды Simulink показал, что технология быстрого моделирования может быть реализована тремя способами: использованием аналитических решений уравнения теплопроводности; решением системы дифференциальных уравнений встроенными методами Simulink; использованием аппарата передаточных функций.

Каждый из данных способов при всей кажущейся простоте реализации приводит к необходимости разработки самостоятельной методики. Поэтому в данной работе будет рассмотрена только одна методика построения тепловой модели температурной погрешности станка на основе аналитических решений уравнения теплопроводности.

Особую актуальность технологии быстрого моделирования имеют при построении тепловых характеристик станка, работающего в условиях переменных тепловых процессов, обусловленных изменяющимися скоростями резания. Особенностью построения таких тепловых характеристик являются условия согласования на границах тепловых характеристик, соответствующих сменяющимся частотам вращения шпинделя

станка. Сложность согласования обусловлена тем, что в одной точке (во времени) сходятся решения двух параметрически различающихся тепловых процессов [17].

Ниже приведено построение температурной характеристики тремя способами для станка, работающего по схеме: 250 об/мин – 10 минут; 1000 об/мин – 40 минут; 3000 об/мин – 40 минут; 5000 об/мин – 40 минут; 3000 об/мин – 40 минут; 1000 об/мин – 120 минут.

Реализация данного способа моделирования основывается на использовании экспериментального модального анализа [8, 18], когда тепловая характеристика может быть представлена в виде:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^m \left(x_{1i} \cdot (1 - e^{-t/x_{2i}}) + x_{3i} \cdot e^{-t/x_{2i}} \right) \quad (1)$$

где x_{1i} – модальная амплитуда; x_{2i} – модальная тепловая постоянная времени, мин; x_{3i} – начальный уровень моды; m – количество температурных мод, t – время.

Ввиду высокой степени корреляции температур и температурных перемещений уравнение (1) применимо для описания как теплового, так и термомодеформационного поведения станка, изменяющегося во времени. Поэтому размерности модальной амплитуды x_{1i} и начального уровня моды x_{3i} определяются выбранным назначением уравнения (1).

Для согласования смежных тепловых характеристик на их границах принимается условие: независимо от количества используемых в модели температурных мод начальный уровень первой моды для следующего режима работы станка и, соответственно, следующей смежной тепловой характеристики, принимается равным достигнутому уровню тепловой характеристики станка в последний момент интервала времени текущего режима.

Например, рассматривая два смежных интервала работы станка $[0, t_1]$ и $[t_1, t_2]$ с различающимися частотами вращения шпинделя n_1 и n_2 , для второго интервала времени уравнение (1) примет вид:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^m \left(x_{1i}^2 \cdot (1 - e^{-t/x_{2i}^2}) + Y(t_1) \cdot e^{-t/x_{2i}^2} \right),$$

$$Y(t_1) = \sum_{i=1}^m \left(x_{1i}^1 \cdot (1 - e^{-t_1/x_{2i}^1}) + x_{3i}^1 \cdot e^{-t_1/x_{2i}^1} \right),$$

$$t \in [t_1, t_2] \quad (2)$$

В уравнении (2) надстрочные индексы соответствуют номерам интервалов работы станка с

различающимися частотами вращения шпинделя. Например, x_{1i}^2, x_{1i}^1 – модальная амплитуда на втором и первом соответствующих интервалах работы станка.

При создании модели в SIMULINK для описания сложного режима работы станка необходим следующий набор базовых компонентов: блоков источников симуляции; блоков функций, определяемых пользователем для задания типовых уравнений (1) и (2); блоков математических и логических операций, подсистем и переключателей; блоков представления результатов моделирования.

Модель в среде Simulink в качестве источника сигнала времени использует блок Clock. Тепловые характеристики представлены блоками задания функции Fcp, в которых реализуются уравнения (1) и (2). Модальные параметры x_{1i}, x_{2i} и x_{3i} определяются методами экспериментального модального анализа, в основе которого лежит решение задачи оптимизации для целевой функции

$$J(n, t, x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{12}, x_{22}, x_{32}, \dots, x_{1m}, x_{2m}, x_{3m}).$$

Целевая функция

$$J(n, t, x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{12}, x_{22}, x_{32}, \dots, x_{1m}, x_{2m}, x_{3m})$$

имеет вид:

$$J(n, \dots) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (Y_s(t_k) - Y(t_k))^2} \quad (3)$$

где $Y_s(t_k), Y(t_k)$ – экспериментальные (измеренные) и расчетные значения функции Y в фиксированные моменты времени t_k .

Задача оптимизации формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \min J(n, t, x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{12}, x_{22}, x_{32}, \dots, x_{1m}, x_{2m}, x_{3m}) \rightarrow 0 \\ x_{1i}, x_{2i}, x_{3i} \in X_{\text{om}}, i = 1, m \end{aligned} \quad (4)$$

При заданных параметрических ограничениях для модальных параметров:

$$\begin{aligned} x_{1i, \min} \leq x_{1i} \leq x_{1i, \max}; x_{2i, \min} \leq x_{2i} \leq x_{2i, \max}; \\ x_{3i, \min} \leq x_{3i} \leq x_{3i, \max}; i = 1, m \end{aligned} \quad (5)$$

Особенностью решения задачи оптимизации (4), (5) является не только выбор начальной точки оптимизации путем задания некоторых фиксированных значений модальных параметров, но и формирование предельных значений в системе

ограничений (5). Конкретные значения задаются исходя из накопленного опыта экспериментальных тепловых исследований станков рассматриваемого типоразмера. Это обусловлено наличием сильной корреляцией модальных параметров с теплоемкостью станка.

Сложный режим работы станка задается блоками Switch Case и Switch Case Action. В блоке Switch Case формируется временная последовательность вида:

$$\langle [0, t_1], [t_{j-1}, t_j], \dots, [t_{n-1}, t_n] \rangle \quad (6)$$

где t_j, t_n – соответствующие интервальные значения времени и время завершения работы станка, в рассматриваемом варианте это 290 мин.

Итоговая тепловая модель станка, в ходе симуляции которой строится тепловая характеристика, представлена на рисунке 1.

В модели предусмотрены близкие по написанию обозначения для блоков функций Fcp, например, Fcp_3000 и Fcp_3000_2. В первом случае это означает формирование аппроксимирующей функции Y при работе станка на 3000 об/мин после частоты 1000 об/мин. В блоке Fcp_3000_2 опять формируется аппроксимирующая функция для тепловой характеристики при работе станка на 3000 об/мин после частоты 5000 об/мин.

Эксперимент и обсуждение результатов моделирования. Натурный эксперимент проводился на фрезерно-расточном станке 400V (производитель ООО «НПО «Станкостроение», г. Стерлитамак).

На рисунке 2 представлены две кривые. Кривая 1 – это экспериментальная тепловая характеристика, полученная для избыточной температуры, измеренной термодатчиком, установленным вблизи передней опоры шпиндельного узла. Использование показаний именно этого датчика объясняется сильной корреляционной связью между фиксируемыми им значениями температуры и экспериментальными значениями температурных перемещений. Кривая 2 – это тепловая характеристика, полученная с использованием математической модели (1) – (5) и структурной схемы модели, представленной на рис. 1.

Максимальная погрешность моделирования не превысила 5 %. В данном случае экспериментальная тепловая характеристика построена по усредненным значениям при относительно небольшом разбросе температуры окружающей среды в пределах 2 °С.

Методика моделирования. Для практической реализации математической модели и структурной схемы тепловой модели была разработана методика теплового моделирования,

включающая девять этапов, представленных девятью блоками (рис. 3). Цель методики – создать формализованную последовательность этапов разработки тепловой модели инвариантной к компоновке станка.

На первом этапе осуществляется постановка задачи моделирования, заключающаяся в формировании тестовой циклограммы работы станка

(блок 1). В общем случае можно сформировать несколько циклограмм. На этом этапе не только описываются циклограммы в виде последовательности (6), но и проводится натурный эксперимент, в ходе которого формируется экспериментальная тепловая характеристика по типу 1 (рис. 2).

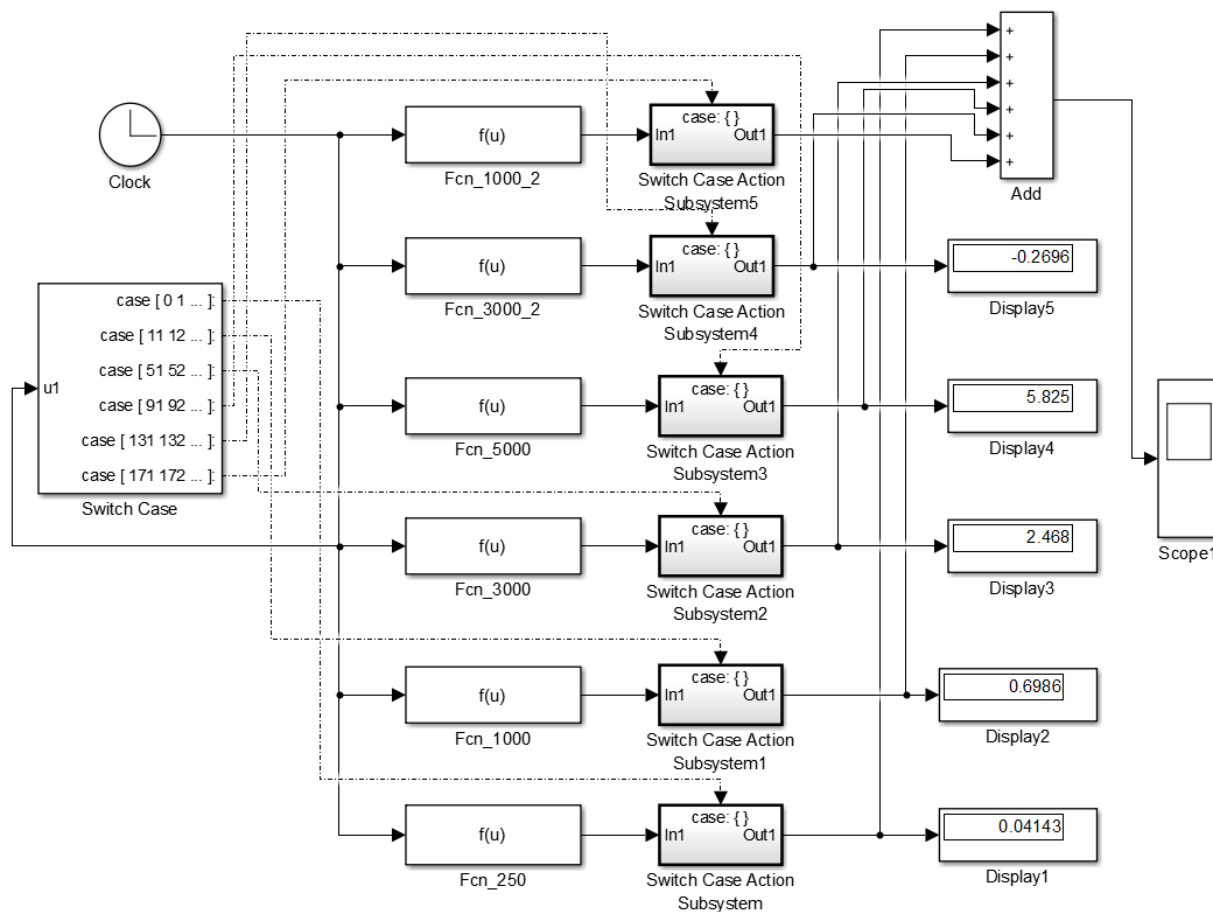


Рис. 1. Модель формирования тепловой характеристики станка

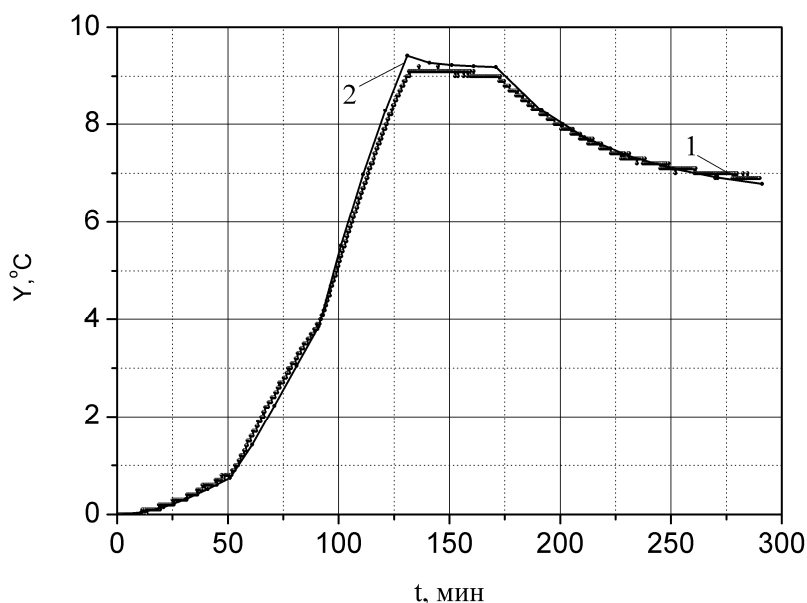


Рис. 2. Экспериментальная (1) и расчетная (2) тепловые характеристики

На втором этапе (блок 2) формируются экспериментальные тепловые характеристики для фиксированных частот вращения шпинделя. В зависимости от требуемой точности моделирования для промежуточных значений частот вращения тепловые характеристики могут быть получены с использованием интерполирующих функций.

На третьем этапе (блок 3) осуществляется построение аппроксимирующих функций вида (1) и (2) с использованием решения задачи оптимизации в постановке (3) – (5). В качестве метода оптимизации для решения подобного класса задач наибольшую эффективность показал метод последовательного квадратичного программирования (Sequential quadratic programming).

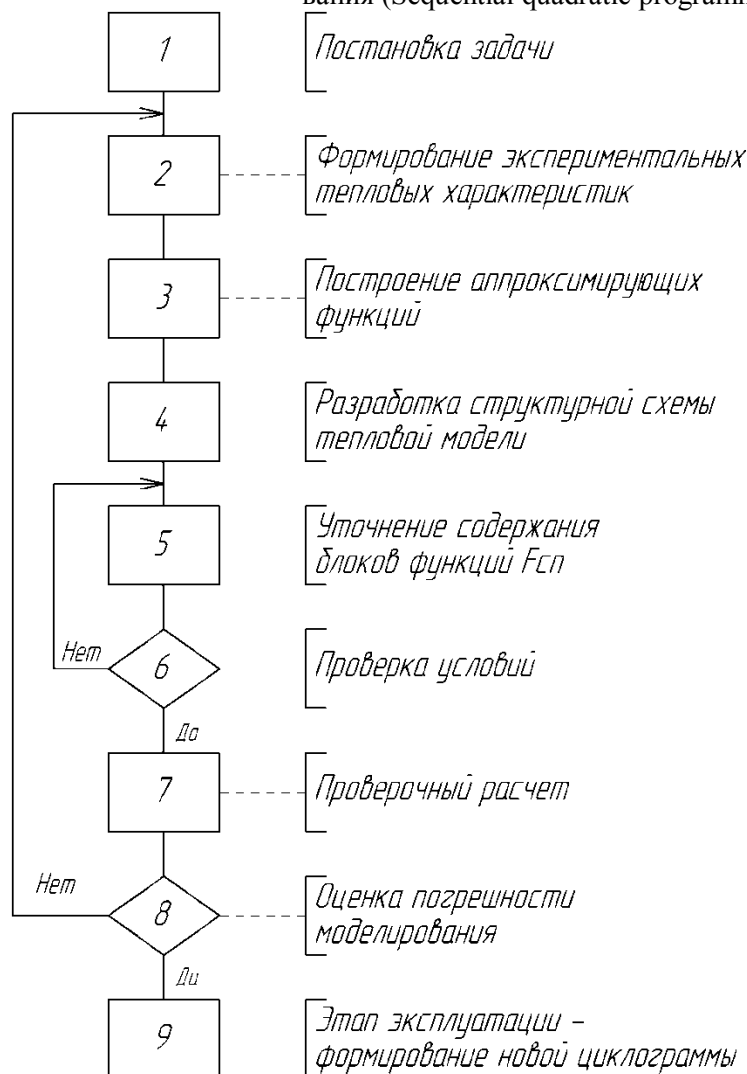


Рис. 3 Схема методики теплового моделирования

На четвертом этапе осуществляется разработка структурной схемы тепловой модели (рис. 1). Практической особенностью реализации схемы является формализация циклограммы в блоке-компоненте Switch Case. Число блоков $F_{сп}$ и порядок их следования определяется циклограммой работы станка.

Для реализации пятого этапа (блок 5) обязательно использование блоков-компонентов Display. Выводимые на них данные соответствуют граничным избыточным значениям искомой функции $Y(t)$ для каждой смены частоты вращения. Использование этих данных позволяет согласовать значения функции $Y(t)$ при смене частот в соответствии с уравнением (2).

В шестом блоке выполняется проверка условия сформированности тепловой модели станка. Это объясняется итерационным и последовательным характером формирования полной тепловой модели для циклограммы. Например, на первой итерации симуляции тепловой модели формируется значение искомой функции $Y(t)$, выводимое в блоке Display1 (рис. 1); на второй итерации значение выводится в блоке Display2 и так далее.

На седьмом этапе (блок 7) осуществляется проверочный расчет и строится модельная тепловая характеристика по типу 2 (рис.2).

Для принятия решения о завершении настройки модели осуществляется переход к

блоку 8, в котором оценивается погрешности моделирования ε :

$$|Y_9(t_k) - Y(t_k)| \leq \varepsilon \quad (7)$$

Принимая некоторое наперед заданное число ε , можно определить качество тепловой модели. При несоблюдении условия (7) выполняется переход в начало схемы, к блоку 2. Это означает, что экспериментальные тепловые характеристики, полученные на втором этапе, были сформированы при существенно различающихся исходных данных, например, при температуре окружающей среды.

Добившись требуемой точности моделирования, можно сформировать окончательную модель для уравнений (1) и (2) и перейти к этапу её эксплуатации – блоку 9. В этом блоке формируется тепловая модель станка, позволяющая построить его тепловую характеристику для сложного режима работы.

Выводы. В работе представлен один из возможных способов построения имитационной тепловой модели станка на этапе эксплуатации. Использование аналитических решений уравнения теплопроводности позволило применить интерактивную систему анализа динамических систем Simulink. Ее использование позволяет эффективно проводить исследование тепловых характеристик станка, работающих в сложных режимах работы. Особенностью реализации математической модели является использование экспериментального модального анализа и принятое условие согласования смежных тепловых характеристик на их границах, правомерность принятия которого была экспериментально доказана малой погрешностью моделирования (менее 5 %).

Для практической реализации предложенного подхода в тепловом моделировании станков была представлена новая методика теплового моделирования.

Полученная в ходе имитационного моделирования тепловая характеристика для сложного режима работы станка может быть использована не только в качестве оценки возможной температурной погрешности, но и в качестве расчетных компенсирующих воздействий, задаваемых для рабочих органов станка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chen W., Luo X., Su H., Wardle F. An integrated system for ultra-precision machine tool design in conceptual and fundamental design stage // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 84 (Issue 5-8). Pp. 1177-1183.

2. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Khomyakov V. S., Molodtsov V. V. Precision and Efficiency of Metal-Cutting Machines // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. No. 9. Pp. 762–773.

3. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F. S., Khomyakov V. S., Molodtsov V.V. Trends in Research on Metal-Cutting Machines // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. No. 6. Pp. 488–495.

4. Lin Z. C., Chang J.S. The building of spindle thermal displacement model of high speed machine center // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 34 (Issue 5-6). Pp. 556–566.

5. Zhang J., Feng P., Chen C., Yu D., Wu Z. A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 68 (Issue 5-8). Pp. 1517–1527.

6. Zhu J., Ni J., Shih A. Robust Machine Tool Thermal Error Modeling Through Thermal Mode Concept // *ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2008. Vol. 130. (Issue 6). Pp. 286–296.

7. A review on spindle thermal error compensation in machine tools // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 95. Pp. 20–38.

8. Mareš M., Horejš O. Modelling of Cutting Process Impact on Machine Tool Thermal Behaviour Based on Experimental Data // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 58. Pp. 152–157.

9. Guo Q., Yang J., Wu H. Application of ACO-BPN to thermal error modeling of NC machine tool // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 50. (Issue 5-8). Pp. 667–675. DOI 10.1007/s00170-010-2520-y

11. Guo Q., Xui R., Yang T., He L., Cheng X., Li Z., Yang JG. Application of GRAM and AF-SACA-BPN to thermal error optimization modeling of CNC machine tools // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 83. (Issue 5-8). Pp. 995–1002.

12. Zhong G., Xu J., Jinling T., Lifei Z. Optimization Design of the Structure for Miniature Engraving Machine based on Orthogonal Experiment and Grey Correlation Analysis // *Global Journal of Technology & Optimization*. 2016. Vol. 7 (Issue 1).: DOI: 10.4172/2229-8711.1000188

13. Поляков А.Н., Гончаров А.Н. Автоматизированная система коррекции температурной погрешности станков с ЧПУ // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2016. №2 (227). С. 33–41.

14. Тугенгольд А.К., Волошин Р.Н., Ющенко С.В. Мониторинг состояния многооперационных станков на базе концепции e-Mind Machine //

Вестник Донского государственного технического университета. 2016. №1(83). С. 77–86.

15. Zhang C., Gao F., Yan L., Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature // Precision Engineering. 2017. Vol. 47. Pp. 231–238.

16. Suzumura F., Makihara H., Ohtani K., Ikeda M., Fukushima C., Katayama G. Thermal De-

formation Prediction in Machine Tool Model by Using Transfer Functions with Time Delay // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 189–193. Pp. 4064–4067.

17. Поляков А.Н., Марусич К.В., Гончаров А.Н. Построение прогнозных моделей тепловых характеристик станков для повторно-кратковременных режимов работы // Справочник. Инженерный журнал. 2013. №1 (190). С.17–23.

Информация об авторах

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов.

E-mail: anp_temos@mail.ru

Оренбургский государственный университет.

460026, Российская Федерация, Оренбург, проспект Победы, 13.

Парфёнов Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета дистанционных образовательных технологий (ФДОТ).

E-mail: ivparfenov@mail.ru

Оренбургский государственный университет.

460026, Российская Федерация, Оренбург, проспект Победы, 13.

Поступила в июле 2018 г.

© Поляков А.Н., Парфёнов И.В., 2018

Polyakov A.N., Parfenov I.V.

SIMULATION MODELING OF THERMAL PROCESSES IN MACHINE TOOLS

The practice of equipment operation shows that during the operation phase of CNC machines the fastest modeling technologies are most in demand, allowing to build models quickly and on the basis of the results obtained, to make corrective actions in the work of various automated systems that ensure the heat resistance of the machine. Currently, the popularity among researchers as technologies for rapid modeling is beginning to recruit simulation methods based on the Simulink application of the Matlab. Analysis of the possibilities of the interactive environment of Simulink showed that the thermal model of the machine can be realized in three ways: using analytical solutions of the heat equation; solving the system of differential equations by the built-in methods of Simulink; using the apparatus of transfer functions. The paper considers the first possible way of constructing a thermal model of a machine working in conditions of variable thermal processes caused by varying cutting speeds. A feature of the construction of the thermal characteristics of the machine are the conditions for their matching at the boundaries corresponding to the changing speeds of the spindle of the machine. A feature of the implementation of the mathematical model is the use of experimental modal analysis. The modal parameters of the approximating functions were determined by solving the optimization problem. To reconcile adjacent thermal characteristics at their boundaries, a hypothetical condition was adopted: regardless of the number of temperature modes used in the model, the initial level of the first mode for the next operating mode of the machine was assumed to be equal to the achieved level of the thermal characteristic of the current mode of operation of the machine at the last moment of the time interval of the current mode. The validity of the accepted condition was experimentally confirmed by a small modeling error of less than 5 %. For practical implementation of the proposed approach, a new method of thermal modeling was presented.

Keywords: thermal characteristics of the machine tool, temperature error, experimental modal analysis, simulation modeling

REFERENCES

1. Chen W., Luo X., Su H., Wardle F. An integrated system for ultra-precision machine tool design in conceptual and fundamental design stage. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, vol. 84, issue 5-8, pp. 1177–1183.
2. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Precision and Efficiency of

Metal-Cutting Machines. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 9, pp. 762–773.

3. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S., Khomyakov V.S., Molodtsov V.V. Trends in Research on Metal-Cutting Machines. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 6, pp. 488–495.

4. Lin Z.C., Chang J.S. The building of spindle thermal displacement model of high speed machine

center. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, vol. 34, issue 5-6, pp. 556–566.

5. Zhang J., Feng P., Chen C., Yu D., Wu Z. A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, vol. 68, issue 5-8, pp. 1517–1527.

6. Zhu J., Ni J., Shih A. Robust Machine Tool Thermal Error Modeling Through Thermal Mode Concept. ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, vol. 130, issue 6, pp. 286–296.

7. A review on spindle thermal error compensation in machine tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, vol. 95, pp. 20–38.

8. Mareš M., Horejš O. Modelling of Cutting Process Impact on Machine Tool Thermal Behaviour Based on Experimental Data. Procedia CIRP, 2017, vol. 58, pp. 152–157.

9. Guo Q., Yang J., Wu H. Application of ACO-BPN to thermal error modeling of NC machine tool. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, vol. 50, issue 5-8, pp. 667–675. DOI 10.1007/s00170-010-2520-y

11. Guo Q., Xui R., Yang T., He L., Cheng X., Li Z., Yang J.G. Application of GRAM and AF-SACA-BPN to thermal error optimization modeling of CNC machine tools. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, vol. 83, issue 5-8, pp. 995–1002.

Information about the author

Aleksandr N. Polyakov, DSc, Professor.

E-mail: anp_temos@mail.ru

Orenburg State University.

Russia, 460026, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Igor' V. Parfenov, PhD, Assistant professor.

E-mail: ivparfenov@mail.ru.

Orenburg State University.

Russia, 460026, Orenburg, av. Pobedy, 13.

Received in July 2018

Для цитирования:

Поляков А.Н., Парфёнов И.В. Имитационное моделирование тепловых процессов в станках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 125–132. DOI: 10.12737/article_5bab4a22b472c2.80360204

For citation:

Polyakov A.N., Parfenov I.V. Simulation modeling of thermal processes in machine tools. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 125–132. DOI: 10.12737/article_5bab4a22b472c2.80360204

12. Zhong G., Xu J., Jinling T., Lifei Z. Optimization Design of the Structure for Miniature Engraving Machine based on Orthogonal Experiment and Grey Correlation Analysis. Global Journal of Technology & Optimization, 2016, vol. 7, issue 1, DOI: 10.4172/2229-8711.1000188

13. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Automated correction system of a temperature error of the CNC machine tool. Handbook. An Engineering journal with appendix, 2016, no. 2 (227), pp. 33–41.

14. Tugengold A.K., Voloshin R.N., Yushchenko S.V. Monitoring of multioperational machines based on the concept e-Mind Machine. Vestnik of Don State Technical University, 2016, no. 1(83), pp.77–86.

15. Zhang C., Gao F., Yan L., Thermal error characteristic analysis and modeling for machine tools due to time-varying environmental temperature. Precision Engineering, 2017, vol. 47, pp. 231–238.

16. Suzumura F., Makihara H., Ohtani K., Ikeda M., Fukushima C., Katayama G. Thermal Deformation Prediction in Machine Tool Model by Using Transfer Functions with Time Delay. Advanced Materials Research, 2011, vol. 189–193. pp. 4064–4067.

17. Polyakov A.N., Marusich K.V., Goncharov A.N. Building a forecast model of heat of Characteristic machine for intermittent running work. Handbook. An Engineering journal with appendix, 2013, no. 1(190), pp. 17–23.