

DOI: 10.34031/article_5cd6df48b5e6d5.34031674

^{1,*}Пожевалкин В.В., ¹Парфёнов И.В., ¹Поляков А.Н.¹Оренбургский государственный университет
Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13.

*E-mail: pozevalkinvv@mail.ru

МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНКОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОИЗВОДНЫХ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Аннотация. В статье представлен разработанный на языке программирования высокого уровня модуль обработки экспериментальных тепловых характеристик станков в режиме реального времени с применением производных высокого порядка. Данный модуль является частью автоматизированной системы тепловых испытаний и диагностики теплового состояния станков. Модуль оснащён графическим пользовательским интерфейсом, работает в режиме реального времени, позволяет не только выполнять процедуры сглаживания экспериментальных тепловых характеристик, но и определять их прогнозные значения. Строить кривые скорости, ускорения и резкости изменения температуры во времени. В разработанном программном модуле реализован новый алгоритм, основанный на методе Горнера. Практика разработки алгоритмического обеспечения показала, что выбранный метод очень удобен для машинной реализации и эффективен, благодаря отсутствию операции деления на каждом вычислительном шаге. Экспериментально было подтверждено, что суммарные затраты на выполнение расчётов значений производных высокого порядка от полинома произвольной степени с применением метода Горнера по описанному алгоритму вполне приемлемы для вычислений в режиме реального времени на стандартном персональном компьютере. С помощью разработанного алгоритма могут обрабатываться как данные температуры, так и данные температурных перемещений рабочих органов станка. Кроме того, данный алгоритм позволяет вычислить значение аппроксимирующего полинома и одновременно получить значения всех его производных в заданной точке. Это позволило решить проблему «сдвига во времени на шаг» положения характерных точек.

Ключевые слова: станок с ЧПУ, тепловые испытания станков, тепловые характеристики, производные, метод Горнера.

Введение. Станки с ЧПУ составляют основу цифрового производства в реальном секторе экономики. Несмотря на то, что проблема энергоэффективности станков с ЧПУ во многом определяет конкурентоспособность действующего производства, тем не менее, проблема обеспечения точности обработки деталей на станках с ЧПУ является более актуальной [1–3]. Практика механообработки показала, что до 75 % всех допускаемых геометрических погрешностей обработки обусловлены тепловыми процессами [4–6]. Важно отметить, что проблема температурной погрешности станков относительно не нова и станкопроизводители уделяют ей самое пристальное внимание. Но появляются новейшие технологии механообработки, которые обязывают решать новые аспекты этой проблемы. Например, сегодня для зубонарезания применяют прогрессивную технологию сухого зубофрезерования червячной фрезой. Авторы работы [7] подсчитали, что если применять этот метод только в автомобилестроении, то ежегодно необходимо будет нарезать 1290 миллионов зубчатых колес. Это является ярким примером роста актуальности тепловых проблем в современном высокотехнологичном производстве. При этом ими экспериментально было установлено, что

применение новой технологии сухого зубофрезерования приводит к погрешностям толщины зуба обрабатываемого колеса до 59 мкм из-за повышенного нагрева обрабатываемой детали. Другие исследователи выявили, что существенная часть потребляемой станком энергии расходуется на системы термостабилизации и компенсации температурной погрешности [8]. При этом проблема обеспечения точности обработки деталей в реальном производстве оказывается более приоритетной в сравнении с экономией энергозатрат [3].

Наряду с системами термостабилизации и компенсации температурной погрешности, в обеспечении точности обработки деталей, важную роль играют автоматизированные системы тепловых испытаний и диагностики [9–11]. Программное обеспечение подобных систем может реализовываться как в специализированных пакетах LabView [12] или Matlab [13], так и с помощью специального авторского программного обеспечения, построенного на базе универсальных языков программирования высокого уровня [14]. Программное обеспечение, разработанное в системах Matlab и LabView, характеризуются высокой степенью надежности. В первую очередь это обусловлено большим набором математических средств, реализованных во встроенных

функциях. У каждой из названных систем есть некоторые особенности, создающие препятствия для их более широкого внедрения при построении автоматизированных систем тепловых испытаний и диагностики. Общим сдерживающим фактором является их высокая рыночная стоимость. Для LabView следует отметить высокий уровень структурированности системы, а для MATLAB неудобство создания загрузочного файла. Для отечественных разработчиков различных IT-решений, дополнительным фактором создания собственных приложений, построен-

ных на базе универсальных языков программирования высокого уровня, является проблема импортозамещения.

Автоматизированная система тепловых испытаний включает следующие элементы: измерительную систему, устройство согласования и преобразования сигналов, термодатчики и датчики температурных перемещений, персональный компьютер, программное средство и интерфейсные устройства. Такая система разработана в Оренбургском государственном университете и представлена на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид подключённой к станку автоматизированной системы:

1 – измеритель температуры МИТ-12ТП; 2 – концентратор для подключения датчиков температуры; 3 – конвертор RS-232/USB; 4 – ноутбук с программным средством

Важнейшим компонентом автоматизированной системы тепловых испытаний и диагностики теплового состояния станка является модуль обработки экспериментальных тепловых характеристик в режиме реального времени.

Для разработки модуля были сформулированы следующие задачи:

- на основе полученных результатов исследований необходимо разработать алгоритмы и программное средство, оснащенное графическим пользовательским интерфейсом;

- программное средство должно формировать прогнозные модели тепловых характеристик;

- программное средство должно работать в режиме реального времени;

- программное средство должно поддерживать возможность постоянного развития и совершенствования.

Для представленной на рисунке 1 автоматизированной системы исходной экспериментальной информацией являются данные, полученные от измерителя температуры МИТ-12ТП. Считы-

вание данных осуществляется через универсальную последовательную шину с помощью конвертора RS-232/USB, необходимого для сопряжения измерителя температуры с ЭВМ.

Одним из важнейших элементов разработанной автоматизированной системы тепловых испытаний станков, имеющей практическое применение, является методика сокращения времени проведения натуральных тепловых испытаний.

Методика сокращения времени проведения натуральных тепловых испытаний. Основная идея методики заключается в определении характерных точек на экспериментальных кривых, позволяющих принять решение о прекращении натурального эксперимента. Распределение этих точек во времени, указывает на кинетику изменения тепловых процессов в станке. Причём особенностью их проявления, является фиксация момента времени эксперимента, после достижения которого, с наибольшей точностью обеспечивается прогнозирование тепловых характеристик [13]. На рис. 2 представлены основные этапы реализации методики сокращенных тепловых испытаний.

В процессе тепловых испытаний выполняются расчёты скорости, ускорения, и резкости изменения тепловых характеристик в режиме реального времени. В основе этих расчётов лежат процедуры аппроксимации и вычисления производных.

На начальном этапе реализации методики к исходным экспериментальным данным применяется процедура аппроксимации с помощью степенной полиномиальной функции. Затем необходимо вычислить все производные до третьего порядка включительно. Следует отметить, что степень полиномиальной функции должна быть как минимум на единицу больше максимального порядка производной. В нашем случае производные первого порядка представляют собой значения скорости изменения температуры во времени. Производные второго порядка ускорение, а производные третьего порядка резкость изменения температуры во времени.

Выполняя этапы 1-5 (рис. 2) последовательно-параллельно в режиме реального времени, можно зафиксировать момент начала температурной стабилизации и достичь эффекта сокращения времени проведения натуральных тепловых испытаний. Но прежде чем приступить к вычислению нормированного коэффициента-индикатора, необходимо предварительно вычислить производные. Для экспериментальных данных, представляющих собой ступенчатую дискретную функцию, вычисление производных представляет собой не тривиальную задачу.



Рис. 2. Основные этапы реализации методики сокращенных тепловых испытаний

Согласно ранее разработанной методике [13] положение специфических точек экспериментальных тепловых характеристик может быть выявлено с помощью производных высокого порядка. Однако для более точной фиксации характерных точек выполняется расчёт нормированного коэффициента-индикатора $K_{\text{var}}(t_i)$.

Теоретические основы метода вычисления производных. Практика определения производных интерполяционными формулами показала наличие проблемы «сдвига во времени на шаг» положения (во времени) характерных точек. В данной работе предлагается применить другой метод вычисления производных, который должен помочь решить эту проблему.

На данный момент известно множество различных методов вычисления производных высокого порядка от полинома произвольной степени. Среди них существует метод неопределенных коэффициентов [15, 16]. Суть этого метода заключается в том, что значения производной в узлах вычисляются как линейные комбинации значений функции:

$$Y^{(k)}(x_p) = \sum_{j=0}^m C_j^{(p)} Y_j + R_m(f), \quad (1)$$

где k – порядок производной; m – степень полинома; $C_j^{(p)}$ – коэффициенты численного дифференцирования; $R_m(f)$ – остаток.

Коэффициенты, в свою очередь, могут быть найдены из системы уравнений:

$$\sum_{j=0}^m C_j^{(p)} X_j^p = \begin{cases} 0 & p = 0, 1, \dots, k-1; \\ \frac{p!}{(p-k)!} X_i^{p-k} & p = k, k-1, \dots, m. \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что систему (2) необходимо решать $m + 1$ раз, а это значит, что речь может идти о существенных вычислительных затратах. Так же следует учесть тот факт, что коэффициенты последних уравнений системы, то есть мономы вида X_m^k становятся настолько большими числами, что их разрядность может переполнять разрядную сетку процессора. Кроме того, коэффициенты первых и последних уравнений это числа разных порядков, следовательно, точность вычислений будет очень низка.

Для степенного полинома следующего вида:

$$p(x) = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0, \quad (3)$$

где x – переменная; m – степень полинома; a – постоянные коэффициенты.

Очевидным способом решения является вычисление каждого монома по отдельности, а затем сложение их вместе. Но это не самый эффективный способ. Гораздо эффективнее применить метод Горнера. Реализацию данного метода можно получить из уравнения (3), если вынести переменную x за скобки всюду, где это возможно. В результате уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$p(x) = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0 = (b_0 x^{m-1} + b_1 x^{m-2} + \dots + b_{m-2} x + b_{m-1})(x - q) + b_m. \quad (8)$$

Коэффициенты b для полинома $p(q)$ рассчитываются по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_m, \\ b_1 &= a_m q + a_{m-1}, \\ b_2 &= a_m q^2 + a_{m-1} q + a_{m-2}, \\ &\dots \\ b_{m-1} &= a_m q^{m-1} + a_{m-1} q^{m-2} + \dots + a_2 q + a_1, \\ b_m &= a_m q^m + a_{m-1} q^{m-1} + \dots + a_1 q + a_0. \end{aligned} \quad (9)$$

В результате получаем конструктивную реализацию теоремы об остатке:

$$p(x) = p_1(x)(x - q) + p(q). \quad (10)$$

Вычислить значение полинома $p_1(x)$, степень которого на единицу меньше степени полинома $p(x)$ можно с помощью следующего уравнения:

$$p(x) = (\dots((a_m x + a_{m-1})x + a_{m-2})x + \dots + a_1)x + a_0. \quad (4)$$

Для дальнейшей реализации метода вычисления производных, полином (3) с его коэффициентами оценивается на элементе q путём замены каждой переменной X на переменную q до получения полинома следующего вида:

$$p(q) = a_m q^m + a_{m-1} q^{m-1} + \dots + a_1 q + a_0. \quad (5)$$

Теперь можно рекурсивно вычислить $p(q)$. Пусть:

$$\begin{aligned} b_0 &= a_m \\ b_k &= b_{k-1} q + a_{m-k} \end{aligned} \quad 1 \leq k \leq m, \quad (6)$$

где k – порядок производной; b – постоянные коэффициенты.

Согласно теореме Безу [18], разделив полином (3) на бином $(x - q)$, в остатке получим число равное значению данного полинома при $x = q$ то есть:

$$p(q) = b_m. \quad (7)$$

В развёрнутом виде уравнение деления полинома на бином с остатком можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} p_1(x) &= (a_1 + a_2 q + \dots + a_{m-1} q^{m-2} + a_m q^{m-1}) + \\ &+ (a_2 + \dots + a_{m-1} q^{m-3} + a_m q^{m-2})x + \dots + \\ &+ (a_{m-2} + a_{m-1} q + a_m q^2)x^{m-3} + \\ &+ (a_{m-1} + a_m q)x^{m-2} + \\ &+ a_m x^{m-1} = a_1 + a_2(x + q) + \dots + \\ &+ a_{m-1}(q^{m-2} + \dots + qx^{m-3} + x^{m-2}) + \\ &+ a_m(q^{m-1} + \dots + q^2 x^{m-3} + qx^{m-2} + x^{m-1}). \end{aligned} \quad (11)$$

При этом полином $p_1(q)$ можно вычислить по формуле:

$$p_1(q) = a_1 + 2a_2 q + \dots + (m - 1)a_{m-1} q^{m-2} + ma_m q^{m-1}. \quad (12)$$

Теперь можно применить одно из свойств метода Горнера, а именно: если умножить производную функцию на число, то и остаток от деления функции на это число возрастёт во столько же раз. Следовательно, для того, чтобы получить значение производной, достаточно просто умножить полученные коэффициенты полинома от деления на числа $1, 2, \dots, k$, в зависимости от того, производную какого порядка необходимо определить в данный момент, а затем вычислить остаток.

Можно проверить данное утверждение. Для этого запишем уравнение полинома произвольной степени:

$$p(x) = \sum_{k=0}^m p_k(q)(x-q)^k. \quad (13)$$

А так же уравнение его производной первого порядка:

$$p'(x) = \sum_{k=1}^m k p_k(q)(x-q)^{k-1}. \quad (14)$$

Следует обратить внимание на то, что данное преобразование выполняется алгебраически, отождествлением коэффициентов $p'(x)$ в терминах коэффициентов $p(x)$. Здесь нет необходимости использовать понятие предела. Кроме того, с помощью формул (13) и (14) могут быть продемонстрированы общие правила производной относительно производных сумм, произведений и состава полинома. Можно продолжить выполнение итерации дифференцирования для получения производных более высокого порядка. Поскольку дифференцирование уменьшает степень полинома на единицу, то полином степени m действителен тогда и только тогда, когда его m -я производная является ненулевой константой.

Теперь можно записать уравнение для вычисления производной высокого порядка от полинома произвольной степени:

$$p^{(k)}(x) = \sum_{i=k+1}^m i(i-1)\dots(i-k+1)(x-q)^{i-k} + k! p_k(q), \quad (15)$$

где $1 \leq k \leq m$.

Подставив в формулу (15) q вместо X , получим:

$$p^{(k)}(q) = k! p_k(q). \quad (16)$$

А это означает, что:

$$p(x) = \sum_{k=0}^m \frac{p^{(k)}(q)}{k!} (x-q)^k. \quad (17)$$

При нулевом значении q полином $p(x)$ имеет кратность m только в том случае, если $p(x)$ можно представить в виде $p(x) = (x-q)^m p_1(x)$, при $p_1(q) \neq 0$. Из разложения в ряд Тейлора видно, что это эквивалентно $p(q) = p'(q) = \dots = p^{(m-1)}(q) = 0$ и $p^{(m)}(q) \neq 0$.

На данный момент ни в одной из известных систем символьных вычислений как отечественного, так и зарубежного производства нет процедуры, реализующей алгоритм описанного выше метода вычисления производных.

Алгоритм метода вычисления производных. Для решения поставленной задачи необходимо разработать алгоритм вычисления значений производных высокого порядка от полинома произвольной степени.

Начальные данные: значение аргумента X , максимальный порядок производной k , вектор коэффициентов полинома $\{A_i\}(i=0, \dots, m)$ и степень полинома m .

Начальные действия. Создаём вспомогательный массив $\{P_i\}$ для хранения значений производных, в котором номера элементов меняются как: $i = 0, \dots, k$.

Шаг 1. Заполняем массив значений производных P начальными данными. Цикл с индексацией по i , меняющейся от 0 до k :

$$P_i = A_m. \quad (18)$$

Шаг 2. Вычисление значения полинома по формуле (4) и остатка от деления по формуле (10). Внешний цикл по i , меняющейся от m до 0:

$$P_0 = P_0 * x + A_i. \quad (19)$$

Если $i > k$, то $l = k$ иначе $l = i$. Вложенный цикл по j , меняющейся от 1 до l :

$$P_j = P_j * x + P_{j-1}. \quad (20)$$

Шаг 3. Вычисление значений производных по формуле (16). Создаём вспомогательную переменную f , для расчёта факториала $f = 1$. Цикл с индексацией по i , меняющейся от 1 до k :

$$\begin{aligned} f &= f * i, \\ P_i &= P_i * f. \end{aligned} \quad (21)$$

Суммарные затраты на выполнение расчётов значений производных высокого порядка от полинома произвольной степени с применением метода Горнера [19, 20] по описанному выше алгоритму вполне приемлемы. Указанный метод очень удобен для машинной реализации и достаточно эффективен, благодаря отсутствию операции деления на каждом вычислительном шаге, что, в свою очередь, позволяет решать подобные уравнения с повышенной степенью точности без существенных машинных погрешностей. Кроме того, данный алгоритм позволяет вычислить значение аппроксимирующего полинома и одновременно получить значения всех его производных в заданной точке.

Результаты эксперимента. Разработанное программное средство, включающее в свой состав программную реализацию описанного выше алгоритма, было написано на языке программирования высокого уровня Pascal в среде разработки Embarcadero RAD Studio Delphi XE6. Проведена проверка его эффективности при расчёте производных высокого порядка от полинома произвольной степени, а также нормированного коэффициента-индикатора для экспериментальных тепловых характеристик станка модели 400V. В качестве иллюстрации полученных результатов

на рис. 3 представлена экранная форма программного средства, обеспечивающего построение графика исходных экспериментальных данных, а также модельных значений аппроксимирующей функции.

На рис. 4 представлена экранная форма, иллюстрирующая расчётные значения скорости, ускорения и резкости изменения температуры во времени, а также показатели нормированного коэффициента-индикатора тепловых характеристик станка в виде графиков.

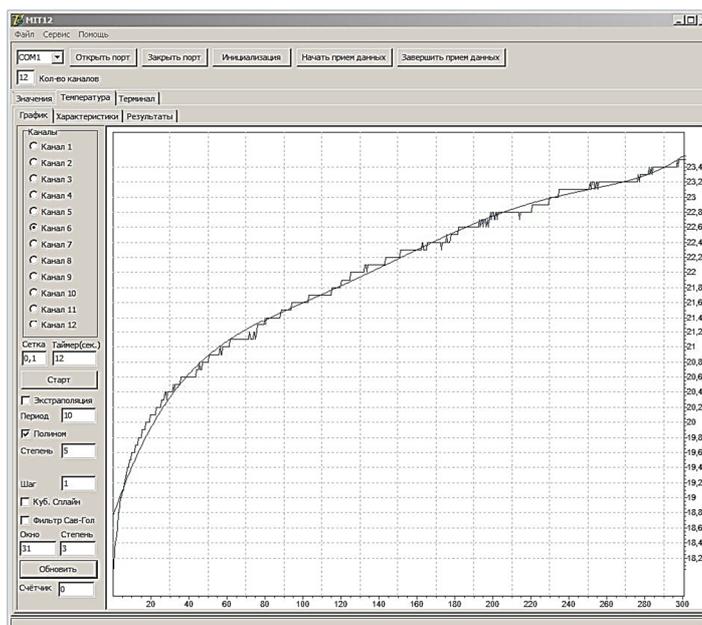


Рис. 3. График исходных экспериментальных данных и аппроксимирующей функции

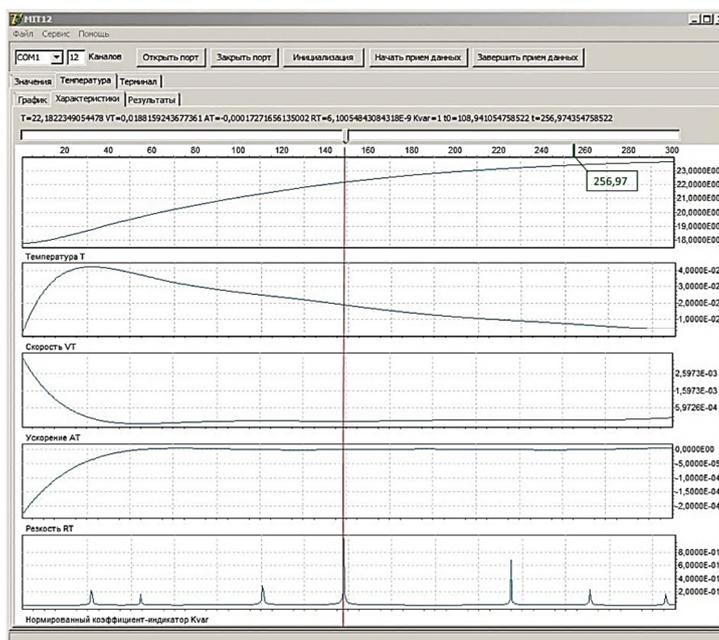


Рис. 4. Графики производных и нормированного коэффициента-индикатора

Из графиков (рисунок 4) видно, что первые два пика, позволяющие с высокой степенью точности идентифицировать характерные точки 1 и 2, представленные на характеристиках изменения температуры $T(t)$, скорости $VT(t)$, ускорения $AT(t)$ и резкости $RT(t)$. Четвертый пик на 147-й минуте, фиксирует время начала процесса температурной стабилизации и завершения эксперимента. А также позволяет рассчитать значение времени температурной стабилизации с относительно малой для реального эксперимента погрешностью. Погрешность определения времени температурной стабилизации, зафиксированная в данном эксперименте, не превысила 10 минут. Все последующие, после 220-ой минуты, пики на графике коэффициента-индикатора (рисунок 4) являются флуктуациями, свидетельствующими о завершающем этапе процесса температурной стабилизации.

Заключение. Таким образом, разработанный программный модуль показал эффективность реализации подхода в разработке программного обеспечения системы тепловых испытаний и диагностики теплового состояния станка, основанного на применении универсальных языков программирования высокого уровня.

Представлен новый алгоритм, реализующий метод Горнера. Практика разработки алгоритмического обеспечения показала, что выбранный метод (Горнера) удобен для машинной реализации и достаточно эффективен, благодаря отсутствию операции деления на каждом вычислительном шаге. Это, в свою очередь, позволяет решать сформированные уравнения с повышенной степенью точности без существенных машинных погрешностей. Кроме того, данный алгоритм позволяет вычислить значение аппроксимирующего полинома и одновременно получить значения всех его производных в заданной точке, что позволило решить проблему «сдвига во времени на шаг» положения (во времени) характерных точек.

В заключении следует отметить, что по единым разработанным алгоритмам могут обрабатываться как данные температуры, так и данные температурных перемещений рабочих органов станка. Как ранее было показано [21], температурные перемещения рабочих органов станка можно зафиксировать измерительным щупом, установленным в шпинделе. Данные о результатах измерений хранятся в виде предопределенных переменных пользователя. Например, для систем ЧПУ Sinumerik в виде R-параметров. В этом случае программный модуль обработки экспериментальных данных должен дополнительно обеспечивать обмен данными с системой ЧПУ. Тогда появится возможность в режиме реального

времени строить экспериментальные зависимости «температуры-температурные перемещения».

Источник финансирования. РФФИ и Оренбургская область в рамках научного проекта № 19-48-560001; Министерство образования Оренбургской области в рамках НИР «Интеллектуальная автоматизированная система диагностики теплового состояния станков с ЧПУ на основе методов аналитического прогнозирования».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S. et al. Precision and Efficiency of Metal-Cutting // Machines Russ. Engin. Res. 2016. Vol. 36. No. 9: 762–773. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090070>
2. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial consideration of thermal issues in machine tools // Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Pp. 723. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6>
3. Grobmann K. et al., “Thermo-Energetic Design of Machine Tools”, Springer, 2015. 260 p.
4. Weck M. et al. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools // Annals of the CIRP. 1995. Vol. 44(2). Pp. 589–598.
5. Jedrzejewski J. et al, Precise Model of HSC Machining Centre for Aerospace Parts Milling // Journal of Mechanical Engineering. 2008. Vol. 8(3). Pp. 29–41.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools // Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61(2). Pp. 771–792.
7. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation // Int J Adv Manuf Technol. 2016. Vol.86. Issue 5–8. Pp. 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5>.
8. Ge Z. & Ding X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools // Int J Adv Manuf Technol 2018. Vol. 97. Issue 1-4. Pp. 1253–1268. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1992-z>
9. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools // Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 91, Issue 1–4. Pp 577–587. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2>
10. Zhou Z.D., Gui L., Tan Y.G. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin // J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30, Issue 5. Pp 1262–1281. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5>.
11. Guo Z., Liu S., Wang H. Dynamic modeling and experimental verification for the feeding system

of a gantry machine tool based on thermal-mechanical coupling // *Int J Adv Manuf Technol* 2016. Vol. 85. Pp. 227. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7941-1>

12. Guo Q., Xu R., Mao C. et al. Application of information fusion to volumetric error modeling of CNC machine tools // *Int J Adv Manuf Technol*. 2015. Vol. 78. Pp. 439. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6656-z>

13. Парфёнов И.В., Поляков А.Н. Методика тепловых испытаний станков на основе кинетических и динамических характеристик температурных перемещений рабочих органов // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2018. № 7. С. 34–39.

14. Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н. Исследование алгоритма построения степенных интерполяционных полиномов при обработке экспериментальных данных в тепловых испытаниях станков // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 4. С. 109–118.

15. Новиков А.И. О суммировании многочленов и методе неопределённых коэффициентов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2011. № 36. С. 98–102.

16. Мироненко Л.П., Петренко И.В. Стандартные пределы и метод неопределённых коэффициентов // *Искусственный интеллект*. 2012. № 3. С. 284–291.

17. Медведева Т.А. О некоторых применениях схемы Горнера при решении задач математического анализа // *Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: психолого-педагогические науки*. 2009. № 3 (7). С. 142–145.

18. McKinnon D. An Arithmetic Analogue of Bezout's Theorem. *Compositio Mathematica*. April 2001. Volume 126. Issue 2. Pp 147–155.

19. Муха В.С., Корчиц К.С. Схема Горнера для многомерно-матричных полиномов // *Вычислительные методы и программирование*. 2005. Т. 6. С. 61–65.

20. Sylvie Boldo, Marc Daumas. A simple test qualifying the accuracy of Horner's rule for polynomials // *Numerical Algorithms*, Springer Verlag, 2004. Vol. 37 (1-4). Pp. 45–60.

21. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Каменев С.В. Методика экспериментальной оценки температурной погрешности станка на рабочем ходу // *СТИН*. 2017. № 11. С. 29–32.

Информация об авторах

Позевалкин Владимир Владимирович, аспирант кафедры систем автоматизации производства. E-mail: pozevalkinvv@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Парфёнов Игорь Валентинович, кандидат технических наук, декан факультета дистанционных образовательных технологий. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поляков Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов. E-mail: anp_temos@mail.ru. Оренбургский государственный университет. Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Поступила в январе 2019 г.

© Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н., 2019

^{1,*}*Pozevalkin V.V., ¹Parfenov I.V., ¹Polyakov A.N.*

¹*Orenburg State University*

Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

**E-mail: pozevalkinvv@mail.ru*

MODULE OF PROCESSING EXPERIMENTAL THERMAL CHARACTERISTICS OF MACHINE TOOLS IN REAL-TIME MODE USING HIGH ORDER DERIVATIVES

Abstract. *The article presents processing module of experimental thermal characteristics of machine tools in real time using high order derivatives. It is developed in a high level programming language. This module is a part of automated system of tests and diagnostics of machines thermal state. The module is equipped with a graphical user interface; it works in real time, allows performing procedures for smoothing experimental thermal characteristics and determining their prognostic values. This allows building curves of speed, acceleration and sharpness of temperature change over the time. The developed software module implements a new algorithm based on the Horner's method. The practice of developing algorithmic software shows that the chosen method is very convenient and effective for machine implementation, due to the absence of a division*

operation at each computational step. It is experimentally confirmed that the total costs of performing the calculations of high order derivatives of an arbitrary degree polynomial using the Horner's method according to the described algorithm are acceptable for real-time calculations on a standard personal computer. Data temperature and temperature movements of the machine working bodies can be processed using the developed algorithms. In addition, this algorithm allows calculating the value of the approximating polynomial and simultaneously obtaining the values of all its derivatives at a given point. This allows to solve the problem of "shift in time by step" of the position of characteristic points.

Keywords: CNC machine, thermal testing of machine tools, thermal characteristics, derivatives, Horner's method.

REFERENCES

1. Bushuev V.V., Kuznetsov A.P., Sabirov F.S. et al. Precision and Efficiency of Metal-Cutting. Machines Russ. Engin. Res. 2016. Vol. 36. No. 9: 762–773. <https://doi.org/10.3103/S1068798X16090070>
2. Putz M., Richter C., Regel J. et al. Industrial consideration of thermal issues in machine tools. Prod. Eng. Res. Devel. 2018. Vol. 12. Pp. 723. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0848-6>
3. Grobmann K. et al., "Thermo-Energetic Design of Machine Tools", Springer, 2015. 260 p.
4. Weck M. et al. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools. Annals of the CIRP. 1995. Vol. 44(2). Pp. 589–598.
5. Jedrzejewski J. et al, Precise Model of HSC Machining Centre for Aerospace Parts Milling. Journal of Mechanical Engineering. 2008. Vol. 8(3). Pp. 29–41.
6. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E. et al. Thermal Issues in Machine Tools. Annals of the CIRP. 2012. Vol. 61(2). Pp. 771–792.
7. Cao H., Zhu L., Li X. et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. Int J Adv Manuf Technol. 2016. Vol.86. Issue 5–8. Pp. 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8314-5>.
8. Ge Z. & Ding X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools. Int J Adv Manuf Technol 2018. Vol. 97. Issue 1-4. Pp. 1253–1268. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1992-z>
9. Wang S., Zhou B., Fang C. et al. Research on thermal deformation of large CNC gear profile grinding machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2017. Vol. 91, Issue 1–4. Pp 577–587. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9442-2>
10. Zhou ZD., Gui L., Tan YG. et al. Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology. Chin. J. Mech. Eng. 2017. Vol. 30, Issue 5. Pp 1262–1281. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0166-5>.
11. Guo Z., Liu S., Wang H. Dynamic modeling and experimental verification for the feeding system of a gantry machine tool based on thermal-mechanical coupling. Int J Adv Manuf Technol 2016. Vol. 85. Pp. 227. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7941-1>
12. Guo Q., Xu R., Mao C. et al. Application of information fusion to volumetric error modeling of CNC machine tools. Int J Adv Manuf Technol. 2015. Vol. 78. Pp. 439. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6656-z>
13. Parfenov I.V., Polyakov A.N. Technique of heat testing of machines based on the kinetic and dynamic characteristics of the temperature displacements of the working bodies [*Metodika teplovyh ispytaniy stankov na osnove kineticheskikh i dinamicheskikh harakteristik temperaturnykh peremeshcheniy rabochnih organov*]. Repair. Recovery. Modernization. 2018. No. 7. Pp. 34–39. (rus)
14. Pozevalkin V.V., Parfenov I.V., Polyakov A.N. The study of the algorithm for constructing power interpolation polynomials in the processing of experimental data in thermal tests of machine tools [*Issledovanie algoritma postroeniya stepennykh interpolacionnykh polinomov pri obrabotke eksperimental'nykh dannykh v teplovykh ispytaniyakh stankov*]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 4. Pp. 109–118. (rus)
15. Novikov A.I. On the summation of polynomials and the method of indefinite coefficients [*O summirovanii mnogochlenov i metode neopredelyonnykh koefitsientov*]. Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University. 2011. No. 36. Pp. 98–102. (rus)
16. Mironenko L.P., Petrenko I.V. Standard limits and the method of uncertain coefficients [*Standard limits and method of undefined coefficients*] Artificial Intelligence. 2012. No. 3. Pp. 284–291. (rus)
17. Medvedeva T.A. On some applications of the Horner scheme for solving problems of mathematical analysis [*O nekotorykh primeneniyakh skhemy Gornera pri reshenii zadach matematicheskogo analiza*]. News of the Baltic State Academy of the Fishing Fleet: Psychological and Pedagogical Sciences. 2009. No. 3 (7). Pp. 142–145. (rus)
18. McKinnon D. An Arithmetic Analogue of Bezout's Theorem. Compositio Mathematica. April 2001. Vol.126. Issue 2. Pp. 147–155.
19. Mukha V.S., Korchits K.S. Horner's scheme for multidimensional polynomials [*Skhema Gornera*

dlya mnogomernomatrichnyh polinomov] Computational methods and programming. 2005. Vol. 6. Pp. 61–65. (rus)

20. Sylvie Boldo, Marc Daumas. A simple test qualifying the accuracy of Horner's rule for polynomials. Numerical Algorithms, Springer Verlag, 2004. Vol. 37 (1-4). Pp. 45–60.

21. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Kamenev S.V. Methods of experimental evaluation of the temperature error of the machine at the working course [*Metodika eksperimental'noj ocenki temperaturnoj pogreshnosti stanka na rabochem hodu*]. STIN. 2017. No. 11. Pp. 29–32. (rus)

Information about the authors

Pozevalkin, Vladimir V. Postgraduate student. E-mail: pozevalkinvv@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Parfenov, Igor' V. PhD, Assistant professor. E-mail: ivparfenov@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Polyakov, Aleksandr N. DSc, Professor. E-mail: anp_temos@mail.ru. Orenburg State University. Russia, 460018, Orenburg, ave. Pobedy, 13.

Received in January 2019

Для цитирования:

Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н. Модуль обработки экспериментальных тепловых характеристик станков в режиме реального времени с применением производных высокого порядка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 155–164. DOI: 10.34031/article_5cd6df48b5e6d5.34031674

For citation:

Pozevalkin V.V., Parfenov I.V., Polyakov A.N. Module of processing experimental thermal characteristics of machine tools in real-time mode using high order derivatives. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 155–164. DOI: 10.34031/article_5cd6df48b5e6d5.34031674