

DOI: 10.12737/article_5ac24a2f383c28.92019302

Позевалкин В.В., магистр, вед. программист,
Парфёнов И.В., канд. техн. наук,
Поляков А.Н., д-р техн. наук, проф.
Оренбургский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ СТЕПЕННЫХ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ПОЛИНОМОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ СТАНКОВ

ivparfenov@mail.ru

В статье исследуется метод аппроксимации экспериментальных данных, содержащих разного уровня погрешности, обусловленные как алгоритмом работы измерительной аппаратуры, так и нелинейным характером тепловых процессов, протекающих в работающем станке. Приведены результаты натурных испытаний сверлильно-фрезерно-расточного станка модели 400V на холостом ходу. Представлена фотография четырех установленных термодатчиков. Информация о температуре фиксировалась с помощью отечественного многоканального измерителя температуры МИТ-12ТП. Результатом проведенных исследований стала разработка и практическая реализация алгоритма построения аппроксимирующих функций на основе степенных полиномов. Алгоритм разработан для построения как интерполирующей, так и экстраполирующей функции. Установлено, что для экспериментальных кривых, не содержащих точки перегиба, разработанный алгоритм построения экстраполяционных функций позволяет практически вдвое сократить время сбора экспериментальных данных, то есть реализовать методику сокращения во времени натурального эксперимента.

Ключевые слова: тепловые испытания станков, погрешность обработки, тепловые характеристики, степенной полином, метод Гаусса.

Введение. При обработке экспериментальных данных, полученных в результате тепловых испытаний станков, возникает необходимость проведения процедуры сглаживания этих данных [1, 2]. Использование сглаженных данных позволяет проводить более глубокую обработку экспериментальных данных, связанную с построением тепловых характеристик на основе производных первого, второго и третьего порядков [3].

В настоящее время практических проблем реализации интерполяционных полиномов нет. Однако, процедуры реализации алгоритмов построения аппроксимирующих зависимостей на основе степенных интерполяционных полиномов представлены в основном в коммерческих программных продуктах иностранного производства: MATLAB, MATHCAD, MAPLE, MATHEMATICA [4-7]. В складывающихся условиях опережающего развития отечественного программного обеспечения актуальным является именно отечественная реализация даже известных алгоритмов.

Методология применения степенных полиномов для обработки экспериментальных данных тепловых испытаний станка. Экспериментальная информация в ходе натурных испытаний станков может быть получена как при непосредственном наблюдении за показаниями измерительных приборов, например, с приме-

нием многооборотных измерительных головок при измерении температурных смещений шпиндельной головки станка [8, 9], так и с применением автоматизированных измерительных систем [1, 10-15]. При этом в обоих случаях тепловые характеристики имеют ступенчатый характер, как представлено на рис. 1. Представленные на рис. 1 характеристики получены в ходе тепловых испытаний на холостом ходу станка 400V (изготовитель НПО «Станкостроение», г. Стерлитамак). Испытания проводились по циклограмме со сменной частот вращения: 250, 1000, 3000, 5000, 3000 и 1000 об/мин.

Работа станка на первой частоте 250 об/мин в течение 10 минут осуществлялась только для предварительного разогрева станка. Изменений температурных смещений шпиндельной головки вдоль вертикальной оси Z зафиксировано не было. Измерения смещений осуществлялись многооборотной индикаторной головкой типа МИГ ГОСТ 9696-82.

На каждой последующей частоте станок работал непрерывно в течение 40 минут. Общая длительность одного испытания станка составила 210 минут. На рис. 1 представлены показания шести термодатчиков из двенадцати установленных на элементах несущей системы станка. Измерения температуры осуществлялись с помощью отечественного многоканального измерителя температуры МИТ-12ТП (АО «НПП «Эталон», г. Омск).

На рис. 2 показано расположение четырех термодатчиков на магнитном основании, установленных под

кожухом шпиндельной головки станка – во время испытаний кожух станка устанавливается штатно.

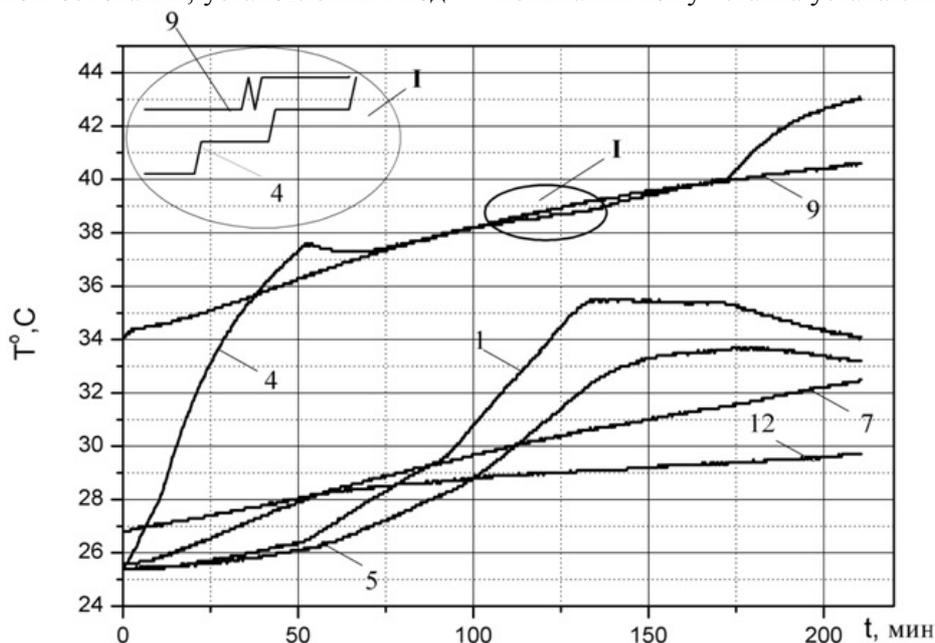


Рис. 1. Тепловые характеристики станка, построенные по показаниям шести датчиков



Рис. 2. Вид установленных термодатчиков в эксперименте

Использование экспериментальных результатов в исходном виде приводит к дополнительным погрешностям и создает препятствия для получения объективной информации о кинетике и динамике теплового процесса, протекающего в станке и формирующего тепловые деформации элементов его несущей системы.

На рис. 1 в выделенной области *I* представлен в масштабированном виде фрагмент кривых 4 и 9, который иллюстрирует ступенчатый характер кривых.

Предварительно проведенный анализ результатов сплайновой интерполяции и интерполяции степенными полиномами с помощью ав-

томатизированной системы вычислений MATLAB показал, что сплайны обеспечивают максимальное приближение модельных значений к экспериментальным. Однако, в этом случае, модельные значения наследуют либо ошибки измерений либо оказываются чрезвычайно чувствительными к малейшим физическим изменениям, протекающим в термодинамической системе станка. При дальнейшем анализе теплового и термодформационного состояния станка эта чувствительность может препятствовать получению глобальных более важных оценок. Например, фиксация моментов времени глобального максимума (или минимума) скорости

или ускорения изменения температуры или температурных смещений элементов несущей системы. Именно поэтому при разработке систем компенсации температурной погрешности станков с ЧПУ [16] важно использовать предварительно сглаженные экспериментальные данные на основе степенных полиномов.

Теоретические основы метода исследования. Степенной полином состоит из суммы степенных функций с постоянными коэффициентами:

$$P_m(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{m-1}x^{m-1} + a_mx^m, \quad (1)$$

где x – переменная, в нашем случае время; m – степень полинома; a – постоянные коэффициенты. $P_m(x)$ – полиномиальная функция степени m , аппроксимирующая тепловые характеристики изменения температуры или тепловых перемещений во времени.

Значения постоянных коэффициентов a можно вычислить методом наименьших квадратов. В качестве внутренних исходных данных

$$T = \begin{pmatrix} n+1 & \sum_{i=0}^n x_i & \sum_{i=0}^n x_i^2 \\ \sum_{i=0}^n x_i & \sum_{i=0}^n x_i^2 & \sum_{i=0}^n x_i^3 \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=0}^n x_i^m & \sum_{i=0}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=0}^n x_i^{m+2} \end{pmatrix}$$

где m – степень полинома; n – число узлов интерполяции; x, y – значение момента времени в которое было получено значение температурной характеристики (температура или перемещение) абсцисса и ордината соответственно.

Вычислить значения элементов основной матрицы (матрицы Грама) G для заполнения расширенной можно с помощью следующего уравнения:

$$G_{jk} = \sum_{i=0}^n x_i^{j+k}, \quad j = 0, 1, \dots, m, k = 0, 1, \dots, m. \quad (3)$$

Следует отметить, что основная матрица обладает некоторыми свойствами полезными для программирования алгоритмов. Во-первых, она является симметричной $G_{ij} = G_{ji}$, что существенно снижает объём вычислительных операций. Во-вторых, её диагональные элементы всегда положительны $G_{ii} > 0$. Кроме того, если выбрать в качестве базиса линейно независимую функцию, то её определитель будет не равен нулю.

Значения вектора столбца свободных членов b_j можно вычислить по формуле:

для реализации алгоритма определения постоянных коэффициентов на основе метода наименьших квадратов выступают: число узлов интерполяции n и степень полинома m . Важнейшим условием сходимости метода является превышение числа узлов интерполяции n над степенью полинома m .

На практике для реализации вычислений по методу наименьших квадратов чаще всего применяется метод последовательного исключения неизвестных, который получил название метод Гаусса. На данный момент этот метод является достаточно универсальным инструментом нахождения решений большинства различных систем уравнений [17].

На начальном этапе реализации вычислений по методу Гаусса необходимо построить расширенную матрицу системы уравнений T , состоящую из основной матрицы с добавлением вектора столбца свободных членов:

$$\left(\begin{array}{c|c} \dots & \sum_{i=0}^n y_i \\ \dots & \sum_{i=0}^n x_i y_i \\ \dots & \dots \\ \dots & \sum_{i=0}^n x_i^m y_i \end{array} \right), \quad (2)$$

$$b_j = \sum_{i=0}^n x_i^j y_i, \quad j = 0, 1, \dots, m. \quad (4)$$

В матричной форме исходная система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$G * a = b, \quad (5)$$

где G – основная матрица системы (матрица Грама); a – вектор неизвестных коэффициентов; b – вектор свободных членов.

Запишем исходную систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} g_{11}a_1 + g_{12}a_2 + \dots + g_{1n}a_n = b_1 \\ g_{21}a_1 + g_{22}a_2 + \dots + g_{2n}a_n = b_2 \\ \dots \\ g_{m1}a_1 + g_{m2}a_2 + \dots + g_{mn}a_n = b_m \end{cases} \quad (6)$$

На следующем этапе необходимо привести систему уравнений (6) к треугольному виду. Алгоритм приведения матриц к треугольному виду получил название прямого хода метода Гаусса и основан на принципе последовательного, начиная с первого столбца, исключения коэффициентов g при неизвестных a :

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{1j_1} a_{j_1} + g_{1j_2} a_{j_2} + \dots + g_{1j_r} a_{j_r} + \dots + g_{1j_n} a_{j_n} = b_1 \\ g_{2j_2} a_{j_2} + \dots + g_{2j_r} a_{j_r} + \dots + g_{2j_n} a_{j_n} = b_2 \\ \dots \\ g_{rj_r} a_{j_r} + \dots + g_{rj_n} a_{j_n} = b_r \\ \dots \\ 0 = b_m \end{array} \right. \quad (7)$$

$$g_{1j_1}, \dots, g_{rj_r} \neq 0.$$

Система уравнений (7) будет несовместна, то есть у неё не будет решений, только в том случае, если какое либо число $b_i \neq 0$ при $i > r$. Допустим, что $b_i = 0$ при любых значениях $i > r$. Тогда все свободные переменные можно перенести за их знаки равенств, разделив при этом каждое из уравнений на свой собственный коэффициент g при неизвестном a , находящийся в самой левой части уравнения ($g_{ij_i}, i = 1, \dots, r, i$ – номер строки, r – число строк):

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{j_1} + \hat{g}_{1j_2} a_{j_2} + \dots + \hat{g}_{1j_r} a_{j_r} = \hat{b}_1 - \hat{g}_{1j_{r+1}} a_{j_{r+1}} - \dots - \hat{g}_{1j_n} a_{j_n} \\ a_{j_2} + \dots + \hat{g}_{2j_r} a_{j_r} = \hat{b}_2 - \hat{g}_{2j_{r+1}} a_{j_{r+1}} - \dots - \hat{g}_{2j_n} a_{j_n} \\ \dots \\ a_{j_r} = \hat{b}_r - \hat{g}_{rj_{r+1}} a_{j_{r+1}} - \dots - \hat{g}_{rj_n} a_{j_n} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\hat{g}_{ij_k} = \frac{g_{ij_k}}{g_{ij_i}}, \hat{b}_i = \frac{b_i}{g_{ij_i}},$$

где $i = 1, \dots, r; k = i + 1, \dots, m$.

На заключительном этапе необходимо вычислить неизвестные a . Алгоритм вычисления неизвестных получил название обратного хода метода Гаусса. В этом случае все полученные базисные переменные могут быть выражены через небазисные. Реализовать вычисления указанным способом можно с помощью следующего уравнения:

$$a_k = \frac{\left(b_k^{(k)} - \sum_{j=k+1}^m g_{kj}^{(k)} a_j \right)}{g_{kk}^{(k)}}, k = m-1, m-2, \dots, 0. \quad (9)$$

В настоящее время общепринятым способом вычисления полиномов высоких степеней является так называемая схема Горнера [18, 19]. Данный метод можно применить практически к любому полиному, так как он является достаточно универсальным и при этом предельно прост в реализации. Реализацию данного метода можно получить из формулы (1), если вынести x за скобки всюду, где это возможно. Тогда можно записать уравнение (1) в следующем виде:

$$P_m(x) = a_0 + (\dots((a_m x + a_{m-1})x + a_{m-2})x + \dots)x. \quad (10)$$

Таким образом, основная задача интерполяции заключается в определении приближённого

значения функции от аргумента x , находящегося внутри заданного интервала $[x_0, x_n]$.

Однако, если требуется определить приближённое значение функции вне заданного интервала $[x_0, x_n]$, то следует рассмотреть возможность применения экстраполяции, основная идея которой заключается в определении сложившихся на текущий момент устойчивых тенденций развития процесса для дальнейшего переноса их на будущее. В этой связи, экстраполяцию можно применить только при соблюдении некоторых допущений, а именно: объём исходных данных достаточен для того, чтобы определить тенденции развития процесса; исследуемый процесс обладает инерционностью, то есть для серьёзных изменений характеристик протекающего процесса требуется время; отсутствие внешних воздействий, способных существенно повлиять на сложившуюся тенденцию развития процесса.

Результат решения поставленной задачи может быть достигнут при выполнении следующих действий. Для начала следует выбрать период упреждения. При чём период упреждения является количественной мерой, представляющий собой число равных интервалов времени на которые разрабатывается прогноз. Далее необходимо вычислить шаг экстраполяции как среднеарифметическое значение аргументов x из базы прогноза. Затем, прибавив к последнему значению аргумента x шаг экстраполяции s , получаем одно значение следующего аргумента x , выходящего за пределы интервала наблюдений. Теперь, подставив полученное расчётное значение аргумента x в уравнение (11), определяем приближённое значение функции в заданной точке. Повторяя подобные действия, можно пошагово определить приближённые значения функции на весь период упреждения. Тогда уравнение (10) можно записать в следующем виде:

$$P_m(x) = a_0 + (\dots((a_m \hat{x} + a_{m-1})\hat{x} + a_{m-2})\hat{x} + \dots)\hat{x},$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - x_{i-1}}{n-1}, \hat{x} = x + s, \quad (11)$$

где x – последнее значение времени; \hat{x} – следующее значение времени; s – шаг экстраполяции.

Таким образом, пошагово определяя значения аргумента x , а затем интерполируя его, можно получить приближённые значения функции выходящие за пределы интервала наблюдений, на весь период упреждения.

Алгоритм построения степенного интерполяционного полинома. Для достижения по-

ставленной цели необходимо разработать алгоритм построения степенного интерполяционного полинома.

Начальные данные: координаты точек $X_i, Y_i (i = 0, \dots, n)$, число узлов интерполяции n и степень полинома m .

Необходимо определить: вектор коэффициентов $\{A_i\} (i = 0, \dots, m)$.

Начальные действия. Создаём вспомогательный массив $\{T_{ij}\}$ в котором номера элементов меняются как: $i = 0, \dots, m, j = 0, \dots, m + 1$.

Шаг 1. Построение расширенной матрицы T с помощью формул (3) и (4). Внешний цикл по числу узлов интерполяции с индексацией по i , меняющейся от 0 до n . Вложенный цикл по степени полинома с индексацией по j , меняющейся от 0 до m :

$$T_{jm+1} = T_{jm+1} + Y_i * X_i^j. \quad (12)$$

Вложенный цикл по степени полинома k , меняющейся от 0 до m :

$$T_{jk} = T_{jk} + X_i^{j+k}. \quad (13)$$

Шаг 2. Приведение расширенной матрицы к треугольному виду по формуле (8). Прямой ход метода Гаусса. Внешний цикл по i , изменяющейся от 0 до m . Выбор главного элемента $l = i$, $\max = |T_{ii}|$. Вложенный цикл $j = i + 1, \dots, m$. Если $|T_{ji}| > \max$, то $l = j$, $\max = |T_{ji}|$. Перестановка столбцов в строке.

Вложенный цикл $k = 0, \dots, m + 1$:

$$\begin{aligned} d &= T_{ik}, \\ T_{ik} &= T_{lk}, \\ T_{lk} &= d. \end{aligned} \quad (14)$$

Вложенный цикл $j = i, \dots, m$:

$$d = T_{ji}. \quad (15)$$

Вложенный цикл $k = i, \dots, m + 1$. Если $i = j$, то:

$$T_{jk} = T_{jk} / d. \quad (16)$$

иначе:

$$T_{jk} = T_{jk} / d - T_{ik}. \quad (17)$$

Шаг 3. Вычисление значений коэффициентов по формуле (9). Обратный ход метода Гаусса. Внешний цикл $i = m, \dots, 0$:

$$s = T_{im+1}. \quad (18)$$

Вложенный цикл $j = i + 1, \dots, m$:

$$s = s - T_{ij} * A_j. \quad (19)$$

Построение вектора коэффициентов:

$$A_i = s / T_{ii}. \quad (20)$$

Далее необходимо вычислить приближённое значение функции $P(x)$ в заданной точке по формуле (10). Алгоритм вычисления по схеме Горнера.

Начальные данные: координата точки x , вектор коэффициентов $A_i (i = 0, \dots, m)$ и степень полинома m .

Необходимо определить: приближённое значение функции $P(x)$ в заданной точке.

Начальные действия. Задаём начальное значение функции $P(x) = A_m$.

Шаг 1. Внешний цикл $i = m - 1, \dots, 0$:

$$P(x) = P(x) * x + A_i. \quad (21)$$

Суммарные затраты на выполнение расчётов значений степенного интерполяционного полинома с применением исследуемого алгоритма относительно небольшие, так как для нахождения решения системы линейных алгебраических уравнений применяется один из наиболее эффективных методов их решения – метод Гаусса [20, 21].

Экспериментальные исследования. По описанному алгоритму было разработано программное средство на языке высокого уровня "Паскаль" и проведена проверка его эффективности при построении аппроксимирующих функций для экспериментальных тепловых характеристик станка 400V. В качестве иллюстрации полученных результатов на рис. 3 представлены: исходные экспериментальные данные в виде графика ступенчатой функции, модельные значения в виде графика приближённых значений функции $P(x)$.

Алгоритм вычисления прогнозных значений (алгоритм экстраполяции) апробирован при построении аппроксимирующих кривых для экспериментальных тепловых характеристик станка 400V. На рис. 4 представлены результаты апробации для одной экспериментальной реализации с применением следующего набора параметров:

- степень полинома = 3;
- период предупреждения = 335;
- шаг экстраполяции = 0,44689349112426;
- общее количество данных для расчётов = 674.

Расчёты выполнены с помощью полинома третьей степени.

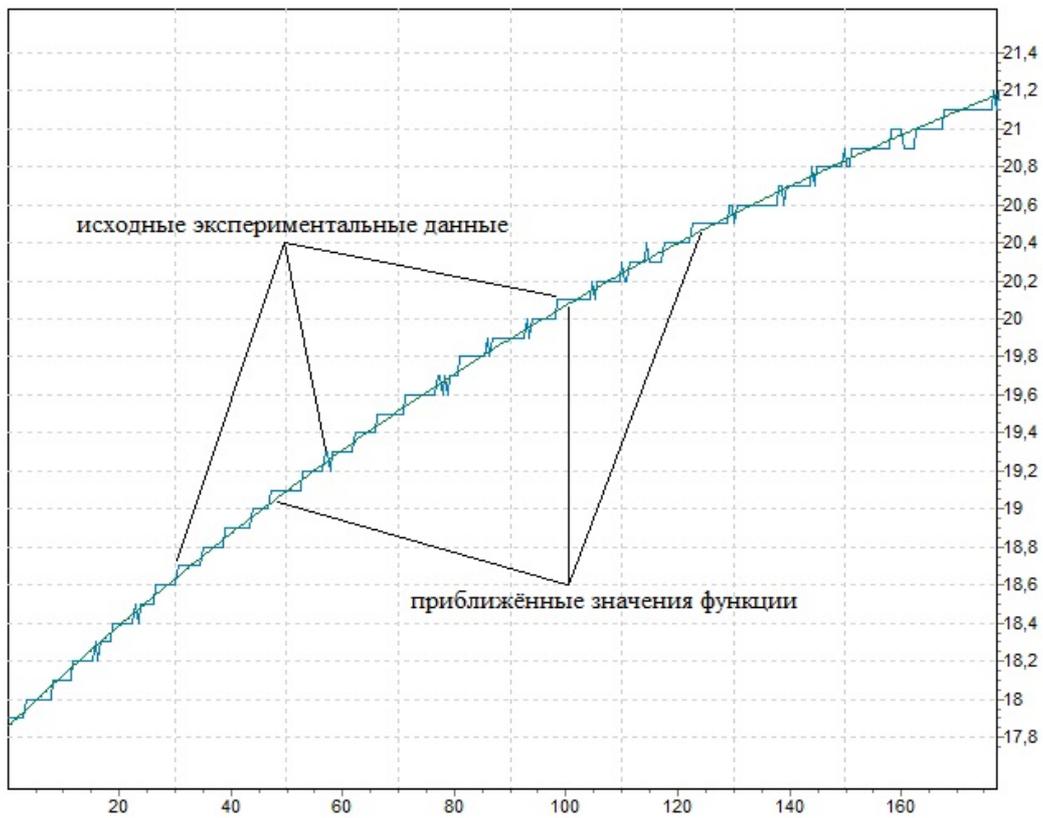


Рис. 3. Результат аппроксимации экспериментальных данных

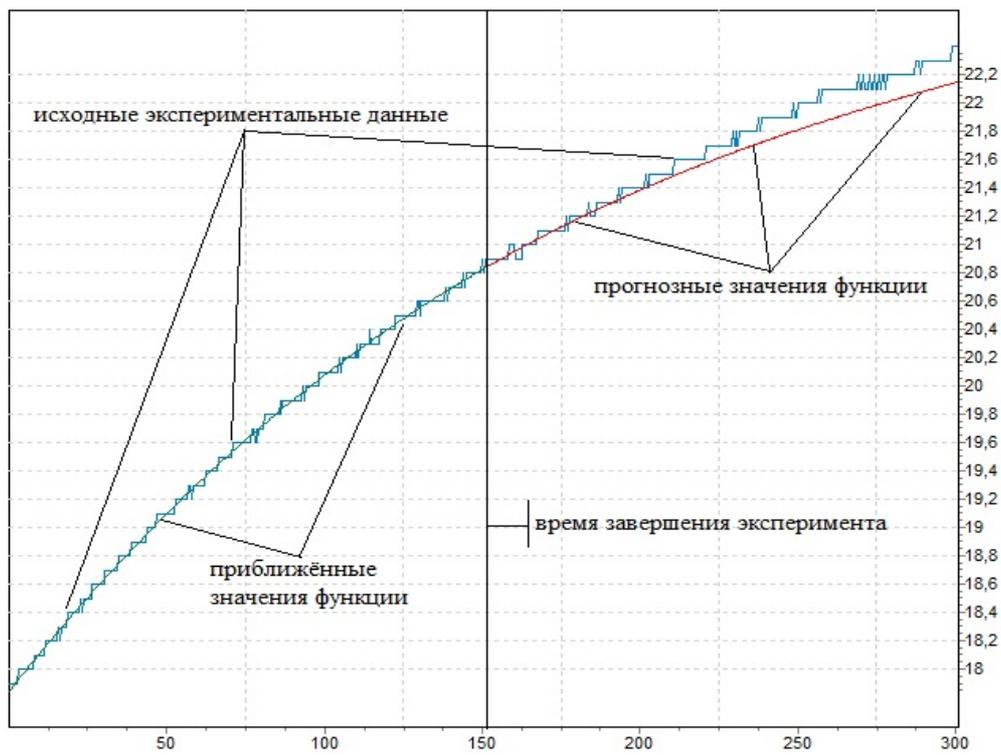


Рис. 4. Результат вычисления прогнозных значений

Следует отметить, что в данном случае период упреждения равен 50-ти процентам от общего количества исходных экспериментальных данных. Это означает, что для построения аппроксимирующей функции использовались экспериментальные данные, зафиксированные в течение почти 150 минут (фактически, с точно-

стью до минуты). Последующие экспериментальные данные (от 150-ой до 300-ой минуты) использовались для оценки точности экстраполяции.

Величина отклонения прогнозных значений от экспериментальных не превысила 1,16%.

Однако, при попытке построить экстраполяционные функции для более сложного харак-

тера кривых, содержащих точки перегиба, был зафиксирован некорректный результат (рис. 5).

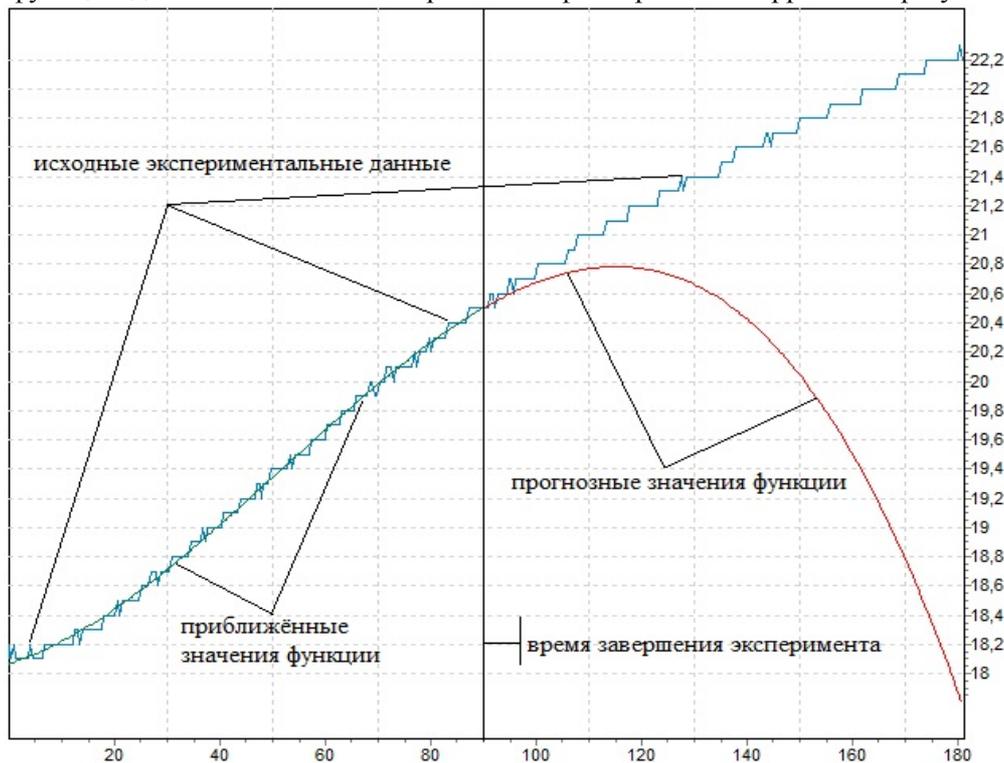


Рис. 5. Ошибка вычисления прогнозных значений

В этой связи способ определения прогнозных значений методом экстраполяции с применением полиномиальной модели требует дальнейших исследований. Тем не менее, полученные результаты интерполяции подтверждают надежность применения разработанного алгоритма для математической обработки экспериментальных данных.

Выводы. Таким образом, разработан и практически реализован алгоритм построения аппроксимирующих функций на основе степенных полиномов.

Для экспериментальных кривых, не содержащих точки перегиба, разработанный алгоритм построения экстраполяционных функций позволяет практически вдвое сократить время сбора экспериментальных данных, то есть реализовать методику сокращения во времени натурального эксперимента.

Разработанные алгоритмы и соответствующее программное средство могут быть применены для предварительной обработки экспериментальных данных, и позволяют генерировать промежуточные значения, что повышает устойчивость реализации последующих алгоритмов обработки данных на базе экспоненциальных функций и производных первого, второго и третьего порядков.

Разработанные алгоритмы, ввиду их компактности, могут быть применены при первичной обработке экспериментальных данных в ре-

жиме реального времени, что особенно актуально при создании диагностической техники для станков и других подобных машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков А.Н., Гончаров А.Н., Каменев С.В. Методика экспериментальной оценки температурной погрешности станка на рабочем ходу // СТИН. 2017. №11. С. 29–32.
2. Кузнецов А.П. Тепловой режим металлорежущих станков. М., Изд-во МГТУ СТАНКИН, Янус-К, 2013. 478 с.
3. Парфёнов И.В. Развитие методики сокращения времени натуральных тепловых испытаний станков // Интеллект. Инновации. Инвестиции. Оренбург, ФГБОУ ВО ОГУ. 2017. С. 64–69.
4. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения Matlab: спец. справочник. СПб.: Питер, 2001. 480 с.
5. Дьяконов В.П. Mathcad 11/12/13 в математике: справочник. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 958 с.
6. Дьяконов В.П. Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании. Библиотека профессионала. М.: Солон-Пресс, 2006. 720 с.
7. Дьяконов В.П. Mathematica 5/6/7. Полное руководство. М.: ДМК-Пресс, 2009. 624 с.
8. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Thermal Characteristics Of Multipurpose Machine Tools //

Russian Engineering Research. 2011. Т.31. №12. С. 1248–1252.

9. Ягопольский А.Г. Анализ коррекции тепловых деформаций в станках. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. №5 (98). С. 98–105.

10. Ягопольский А.Г., Кропотин Н.Ю. Аппаратно-программное обеспечение исследований состояния токарных станков по параметрам траекторий перемещения суппортного узла // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №5 (674). С. 84–90.

11. Hori S., Nishiwaki N. Study on Thermal Deformation of Machine Tool Structure Estimated by Its Basic Characteristics // Transaction of Japan Society of Mechanical Engineering. С. 1998. Vol. 64. №.621. Pp. 1836–1841.

12. Shamoto E., Hino R., Tomie T., Matsubara Y., Moriwaki T. Estimation of Thermal Deformation of Machine Tool by Utilizing Available Information in CNC Unit // Transaction of Japan Society of Mechanical Engineering. С. 2003. Vol. 69. №. 686. Pp. 2775–2782.

13. Yoshikawa H., Matsumura S., Hashizume H., Shinno H. Minimizing Thermal Deformation of Aerostatic Spindle System by Temperature Control of Supply Air // JSME international journal. Series C. 2006. Vol.49. № 2. Pp. 606–611.

14. Gebhardt M., Schneeberger A., Weikert S., Knapp W., Wegener K. Thermally caused location errors of rotary axes of 5 axis machine tools // Int. J. of Automation Technology. 2014. Vol. 8(4). Pp. 511–522.

Информация об авторах

Позевалкин Владимир Владимирович, магистр, ведущий программист факультета дистанционных образовательных технологий.

E-mail: pozevalknvv@mail.ru.

Оренбургский государственный университет.

Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы, д. 13.

Парфёнов Игорь Валентинович, кандидат технических наук, доцент, 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.

15. Jędrzejewski J., Kowal Z., Kwasny W., Winiarski Z. In-house system for holistic modelling of machine tool operating properties // 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics. ICSAI 2015. pp. 411–416. DOI: 10.1109/ICSAI.2014.7009324.

16. 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.

17. Федоров Ф.М., Иванова О.Ф., Павлов Н.Н. Об особенностях бесконечных систем // Математические заметки СВФУ. 2015. Т. 22. №4. С. 62–78.

18. Afanas'ev A.P., Dzyuba S.M., Emelyanova I.I. Horner's scheme for investigation of solutions of differential equations with polynomial right-hand side // Бизнес-информатика. 2017. № 2 (40). С. 33–39.

19. Калиткин Н.Н., Колганов С.А. Прецизионные аппроксимации функций Ферми–Дирака целого индекса // Матем. моделирование. 2016. Т.28. №3. С. 23–32.

20. Завьялов В.В. Применение итерационного процесса Гаусса–Зейделя в методе выделения диагонального элемента для задач переноса теплового излучения // Атомная энергия. 2014. Т.117. №3. С. 127–131.

21. Lapin A.V., Zalyalov D.G. Penalty method for the state equation for an elliptical optimal control problem // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Mat. 2015. №. 7. Pp. 36–48.

Поступила в марте 2018 г.

© Позевалкин В.В., Парфёнов И.В., Поляков А.Н., 2018

V.V. Pozevalkin, I.V. Parfenov, A.N. Polyakov

RESEARCH OF THE ALGORITHM FOR CONSTRUCTING DEGREE INTERPOLATION POLYNOMIALS AT THE PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA IN THERMAL TESTS OF MACHINE TOOLS

The article studies the approximation method of the experimental data containing various levels of inaccuracy caused either by an algorithm of the measuring equipment work, or by the nonlinear character of thermal processes proceeding in a working machine. The results of full-scale tests of a drilling-milling-boring machine model 400V at idling are given. A photograph of the four installed sensors is presented. The temperature data were recorded using a domestically-produced multi-channel temperature meter MIT-12TP. The result of the research was the development and practical implementation of the algorithm for constructing approximating functions on the basis of degree polynomials. The algorithm is designed to construct both interpolating and extrapolating functions. It was found that for the experimental curves containing no inflection points, the algorithm for extrapolation functions construction allows almost halving the time of experimental data collection, that is reducing the time necessary for the experiment.

Keywords: thermal testing of machines, processing error, thermal characteristic, degree polynomial, Gauss method.

REFERENCES

1. Polyakov A.N., Goncharov A.N., Kamenev S.V. Technique of experimental estimation of the temperature error of the machine on the working stroke // *Machines and Tooling*, 2017, no. 11, pp. 29-32.
2. Kuznecov A.P. Thermal regime of metal-cutting machines M.: MGTU STANKIN, YAnus-K. 2013, 478 p.
3. Parfenov I.V., Polyakov A.N. Development of a technique for reducing the time of full-scale thermal testing machines // *Intelligence. Innovations. Investment*, 2017, pp. 64–69.
4. D'yakonov V.P., Kruglov V.V. Mathematical packages of the Matlab extension: spec. directory. SPb.: Peter, 2001, 480 p.
5. D'yakonov V.P. Mathcad 11/12/13 in mathematics: a reference book. M.: Hot Line-Telecom, 2007, 958 p.
6. D'yakonov V.P. Maple 9.5/10 v matematike, fizike i obrazovanii. Biblioteka profesionala [Maple 9.5 / 10 in mathematics, physics and education. Library professional]. Moscow: Solon-Press, 2006, 720 p.
7. D'yakonov V.P. Mathematica 5/6/7. Mathematica 5/6/7. Complete Guide. M.: DMK-Press, 2009, 624 p.
8. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Thermal Characteristics Of Multipurpose Machine Tools // *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 12, pp. 1248-1252.
9. YAgopol'skij A.G. Analysis of the correction of thermal deformations in machine tools // *Bulletin of MSTU. N.E. Bauman. Ser. Mechanical engineering*, 2014, no. 5 (98), pp. 98–105.
10. YAgopol'skij A.G., Kropotin N.YU. Hardware-software for the study of the state of lathes on the parameters of the trajectories of the movement of the support unit // *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2016, no. 5 (674), pp. 84–90.
11. Hori S., Nishiwaki N. Study on Thermal Deformation of Machine Tool Structure Estimated by Its Basic Characteristics // *Transaction of Japan Society of Mechanical Engineering C*. 1998, vol. 64, no. 621, pp. 1836–1841.
12. Shamoto E., Hino R., Tomie T., Matsubara Y., Moriwaki T. Estimation of Thermal Deformation of Machine Tool by Utilizing Available Information in CNC Unit // *Transaction of Japan Society of Mechanical Engineering. C*. 2003, vol. 69, no. 686, pp. 2775–2782.
13. Yoshikawa H., Matsumura S., Hashizume H., Shinno H. Minimizing Thermal Deformation of Aerostatic Spindle System by Temperature Control of Supply Air // *JSME international journal. Series C*, 2006, vol.49, no. 2, pp. 606–611.
14. Gebhardt M., Schneeberger A., Weikert S., Knapp W., Wegener K. Thermally caused location errors of rotary axes of 5 axis machine tools // *Int. J. of Automation Technology*. 2014. vol. 8(4), pp. 511–522.
15. Jedrzejewski J., Kowal Z., Kwasny W., Winiarski Z. In-house system for holistic modelling of machine tool operating properties // 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics. ICSAI 2015. pp. 411–416. DOI: 10.1109/ICSAI.2014.7009324.
16. Polyakov A.N., Goncharov A.N. Automated system for correcting the temperature error of CNC machines // *Directory. Engineering Journal with the application*, 2016, no. 2 (227), pp. 33–41.
17. Fedorov F.M., Ivanova O.F., Pavlov N.N. On the singularities of infinite systems // *Mathematical notes of NEFU*. 2015, vol. 22, no. 4, pp. 62–78.
18. Afanas'ev A.P., Dzyuba S.M., Emelyanova I.I. Horner's scheme for investigation of solutions of differential equations with polynomial

right-hand side // Business Informatics, 2017, no. 2 (40), pp. 33–39.

19. Kalitkin N.N., Kolganov S.A. Precision approximations of Fermi-Dirac functions of the whole index // Mod. Modeling, 2016, vol. 28, no. 3, pp. 23–32.

20. Zav'yalov V.V. The use of the iterative process of Gauss-Seidel method of singling out a diag-

onal element for thermal radiation transport // Atomic energy, 2014, vol. 117, no. 3, pp. 127-131.

21. Lapin A.V., Zalyalov D.G. Penalty method for the state equation for an elliptical optimal control problem // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Mat. 2015, no. 7, pp. 36–48.

Information about the author

Vladimir V. Pozevalkin, Masterstudent, Lead programmer.

E-mail: pozevalkinvv@mail.ru.

Orenburg State University.

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

Igor' V. Parfenov, PhD, Assistantprofessor.

E-mail: ivparfenov@mail.ru.

Orenburg State University.

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

Aleksandr N. Polyakov, PhD, Professor.

E-mail: anp_temos@mail.ru.

Orenburg State University.

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

Received in March 2018