УДК 621.431

А.В. Неменко, канд. техн. наук, доцент,
М.М. Никитин, инженер
Севастопольский национальный технический университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053
E-mail: valesan@list.ru

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Предложен алгоритм оценки теплового поля судовой энергетической установки с ближним прогнозом температур в контрольных точках.

Ключевые слова: *судовая энергетическая установка, прогноз теплового поля, ближний прогноз, диагностика.*

Введение. Тепловое поле оказывает существенное влияние на работоспособность судовой энергетической установки (СЭУ), так как под его воздействием происходит изменение структуры, их механических характеристик материала деталей агрегата.

Наиболее опасны переходные процессы, когда резкая смена температур и пиковые перегрузки могут вызывать напряжения разрушительного характера.

Условием нормальной работы судовой энергетической установки является соблюдение эксплуатационного регламента, установленного заводом-изготовителем. Однако высокая удельная мощность СЭУ, в сочетании с агрессивными условиями работы могут вызывать отклонения от штатного режима, что определяет необходимость специальных производственных мероприятий с целью обеспечения безотказной работы. Для предотвращения аварии необходимо иметь не только оперативную информацию о текущем состоянии теплового поля, но и прогнозно-перспективную. Задача может быть разделена иерархически, на нижнем уровне будут прогнозы отдельных параметров, в частности, температура в контрольных точках.

Мониторинг температурного поля позволяет выявить аномалии рабочего процесса и принять необходимые меры безопасности.

Качество прогноза во многом зависит от количества охватываемых системой контрольных точек, которое при одной и той же аппаратной базе лимитируется затратностью применяемых методов обработки информации, поступающей с каждого датчика.

В [2] предложен алгоритм дальнего прогноза температуры контрольной точки с помощью преобразования временного ряда значений в асимптотический ряд. Результатом прогноза является предельное значение температуры без указания времени, в течение которого оно будет достигнуто, и промежуточных значений, в том числе и критично-недопустимых параметров. Управляющее воздействие системы автоматического регулирования по дальнему прогнозу должно подтверждаться ближним прогнозом, гарантирующим нахождение температур всех контрольных точек в допустимой области значений. В связи с большим количеством однотипных вычислений, необходима оптимизация их алгоритма в целях согласования адекватности результата и трудоемкости вычислений

Классические методы скользящего среднего с постоянными весовыми коэффициентами обладают наименьшими вычислительными затратами [3], но требуют выполнения допущений о характере самого ряда. Кроме того, в случае одного знака всех коэффициентов их применение приводит к запаздыванию прогноза, что недопустимо в рассматриваемой задаче.

Для ближнего прогноза используем более ресурсоемкие алгоритмы экстраполяции температурного ряда с применением полинома Лагранжа, проходящего через фиксированное количество известных значений. При этом знание набора коэффициентов полинома, необходимое для задачи интерполяции, в данном случае оказывается избыточным.

Цель работы – разработка оптимального алгоритма оценки теплового процесса в судовой энергетической установке с ближним прогнозом температуры контрольных точек.

Постановка задачи. Рассмотрим последовательный ряд температур *T*, контрольной точки, состоящий из $(m+1)$ измерений

$$T = T_0, T_1, T_2, ...T_m , \qquad (1)$$

полученных при равноотстоящих значениях времени *t*

$$t = t_0, t_1, t_2, ..., t_m \qquad (2)$$

с шагом между соседними измерениями, равным Δt .

По этим данным составлена модель динамики теплового процесса на основании скользящего среднего

$$T_{m+1} = \frac{1}{q_m} \cdot \left(s - \sum_{i=0}^{m-1} q_i \cdot T_{i+1} \right), \tag{3}$$

где
$$s = \sum_{i=0}^{m} q_i \cdot T_i \ . \tag{4}$$

Найдены такие коэффициенты q_i, при которых прогноз с помощью (3) дает то же значение, что и экстраполяция полиномом Лагранжа, проходящим через все точки (1).

Материал исследования

Рассмотрим модель скользящего среднего с окном, захватывающим все значения (1) и весовыми коэффициентами

$$q_i = (-1)^i \cdot \binom{m}{i}, \tag{5}$$

где $i = 0,...,m-1$, $\binom{m}{i}$ – биномиальный коэффициент порядка m степени i, $\binom{m}{i} = \frac{m!}{i!(m-i)!}$.

Для стационарности процесса независимость суммы (4) от сдвига p окна прогнозирования:

$$s^{(p)} = \sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot T_{i+p} = \mathrm{const} \ . \tag{6}$$

При совпадении производящей функции ряда (1) с параболической зависимостью порядка, равного величине окна, требуемые свойства модели будут обеспечиваться автоматически.

Свойство стационарности.

Пусть значения временного ряда (1) описываются полиномом Лагранжа порядка m

$$T(t) = \sum_{n=0}^{m} c_n \cdot (t - t_0)^n \ , \tag{7}$$

где c_n – коэффициенты полинома. Запишем прогнозное значение той же величины с учетом (3), (5) и (7)

$$T_{m+1} = (-1)^m \cdot \left(s - \sum_{i=0}^{m-1} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot \sum_{n=0}^{m} c_n \cdot (i+1)^n \cdot \Delta t^n \right), \tag{8}$$

где

$$s = \sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot \sum_{n=0}^{m} c_n \cdot i^n \cdot \Delta t^n \ . \tag{9}$$

Для вычисления суммы (9) использованы тождества комбинаторики:

$$\sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot i^k = 0 \ , \ 0 \le k < m, k \text{ – целое}, \tag{10}$$

$$\sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot i^k = m! \, , k = m \, , k \text{ – четное}, \qquad \sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot i^k = -m! \, , k = m \, , k \text{ – нечетное}.$$

Последние два выражения объединим в виде

$$\sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot i^m = (-1)^m \cdot m! \, , m \text{ – целое}. \tag{11}$$

С учетом (10)и (11) из (9) следует:

$$s^{(0)} = (-1)^m \cdot m! \cdot c_m \cdot \Delta t^m \ . \tag{12}$$

Для проверки свойства (6) принято $(p = 1)$.

Рассмотрим сумму $s^{(1)}$, полученную из (9) заменой T_i на T_{i+1}

$$s^{(1)} = \sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot \sum_{n=0}^{m} c_n \cdot (i+1)^n \cdot \Delta t^n \;. \tag{13}$$

Учитывая, что для любого a разложение $(i+a)^n$ в бином Ньютона содержит степени i не более n и не менее 0, а также учитывая соотношения (11) и (12), запишем

$$\sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot (i+1)^k = \sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m}{i} \cdot i^k \,,\; 0 \le k \le m,\; k - \text{целое}. \tag{14}$$

Из (14) следует

$$s^{(0)} = s^{(1)} = (-1)^m \cdot m! \cdot c_m \cdot \Delta t^m \,, \tag{15}$$

что обусловливает независимость суммы (4) с коэффициентами (5) от сдвига p при сдвиге индексов на один элемент. С помощью аналогичных рассуждений может быть установлено равенство $s^{(1)}$ и $s^{(2)}$, затем $s^{(r)}$ и $s^{(r+1)}$, где r – целое число, $0 \le r \le p$.

Последовательно варьируя r от $(r=0)$ до $(r=p)$, получим равенство любых двух соседних сумм в данном интервале, откуда следует $s^{(0)} = s^{(p)}$.

Свойство совпадения прогнозного значения с экстраполяцией полиномом Лагранжа.

Значение, экстраполированное с помощью полинома Лагранжа (7):

$$T_{m+1} = \sum_{n=0}^{m} c_n \cdot (m+1)^n \cdot \Delta t^n \;. \tag{16}$$

Значение T_{m+1}, полученное с помощью модели (3) с коэффициентами (5), с учетом (8), (9) и (13) приобретает вид:

$$T_{m+1} = (-1)^m \cdot \left(s^{(0)} - s^{(1)} + (-1)^m \cdot \sum_{n=0}^{m} c_n \cdot (m+1)^n \cdot \Delta t^n \right) . \tag{17}$$

Согласно (15), значения (16) и (17) совпадают.

Преобразования расчетных формул.

Для практического использования рассматриваемой модели упрощено соотношение (8). Учитывая тождество

$$\binom{a}{b} + \binom{a}{b+1} = \binom{a+1}{b+1}, \tag{18}$$

преобразуем (3) к виду

$$T_{m+1} = (-1)^m \sum_{i=0}^{m} (-1)^i \cdot \binom{m+1}{i} \cdot T_i \;. \tag{19}$$

При фиксированной размерности окна прогнозирования m формула (19) содержит m операций умножения с плавающей запятой, что показывает трудоемкость алгоритма $O(m)$.

Применение алгоритма, основанного на формуле Лагранжа

$$L_m(t) = \sum_{i=0}^{m} T_i \frac{(t-t_0)\cdot(t-t_1)\cdot\ldots\cdot(t-t_{i-1})\cdot(t-t_{i+1})\cdot\ldots\cdot(t-t_m)}{(t_i-t_0)\cdot(t_i-t_1)\cdot\ldots\cdot(t_i-t_{i-1})\cdot(t_i-t_{i+1})\cdot\ldots\cdot(t_i-t_m)}, \tag{20}$$

содержит $(m+1)$ операций деления и $(m+1)\cdot m\cdot(m-1)$ операций умножения с плавающей запятой, что можно представить как трудоемкость алгоритма $O(m^3)$. Операции сложения и вычитания занимают гораздо меньше процессорного времени и поэтому в первом приближении могут не учитываться.

Пример применения метода

Значения температуры T контрольной точки в зависимости от времени t образуют фрагмент временного ряда, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Фрагмент временного ряда температурных измерений

i	0	1	2	3	4	5	6
t_i, с	0	15	30	45	60	75	90
T_i, °С	53,16	52,18	51,15	50,10	49,04	47,94	46,86

Требуется, используя первые пять значений температуры, вычислить шестое значение с помощью экстраполяции значений параболой пятой степени.

Применив формулу (20), запишем

$$L_5(t) = \sum_{i=0}^{5} T_i \frac{(t-0)\cdot(t-15)\cdot\ldots\cdot(t-t_{i-1})\cdot(t-t_{i+1})\cdot\ldots\cdot(t-75)}{(t_i-0)\cdot(t_i-15)\cdot\ldots\cdot(t_i-t_{i-1})\cdot(t_i-t_{i+1})\cdot\ldots\cdot(t_i-75)} \ . \qquad (21)$$

Учитывая представленные в таблице 1 значения, при подстановке их в (21) получим

$$L_5(90) = T_6 = 46{,}71\,^\circ\mathrm{C}\ . \qquad (22)$$

Продублируем решение той же задачи с помощью формулы (19)

$$T_6 = -(T_0 - 6\cdot T_1 + 15\cdot T_2 - 20\cdot T_3 + 15\cdot T_4 - 6\cdot T_5) = 46{,}71\,^\circ\mathrm{C}\,, \qquad (23)$$

что совпадает с (22). Отклонение от измеренного значения составляет 0,15 ºС или 0,32 % в меньшую сторону.

Выводы. Предложен алгоритм прогнозной оценки теплового процесса в судовой энергетической установке. Получена и обоснована формула (19) экстраполяции значений ближнего прогноза теплового процесса, дающая те же значения, что и проходящий через все точки точки окна прогнозирования полином Лагранжа, при вычислительных затратах, пропорциональных первой степени порядка полинома $O(m)$ по сравнению с кубом порядка $O(m^3)$ при непосредственном использовании полинома. В частности, в приведенном примере с экстраполяцией таблицы с помощью полинома пятой степени $(m=5)$, количество операций при использовании предлагаемого алгоритма будет в 25 раз меньше, чем при использовании формулы Лагранжа (21).

Предлагаемый метод с применением формулы (19) прогнозирования теплового поля вместо классической полиномиальной экстраполяции предоставляет значительные резервы при построении системы диагностики энергетической установки и движительного комплекса, которые могут быть использованы для увеличения количества обрабатываемых контрольных точек и повышения качества её работы.

Библиографический список использованной литературы

1. Колызаев Б.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б.А. Колызаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиненко.— Л.: Судостроение, 1980. — 472 с.

2. Неменко А.В. Применение асимптотических методов к задаче прогнозирования тепловых переходных процессов в судовой энергетической установке/ А.В. Неменко, М.М. Никитин // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. — Севастополь, 2011. — Вып. 119. — С. 66–70.

3. Бокс Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление (ч. 1) / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. — М.: Наука, 1974. — 405 с.

Поступила в редакцию 27.03.2014 г.

Неменко О.В., Нікітін М.М. Прогнозна оцінка теплового поля в суднові енергетичні установці

Запропонований алгоритм прогнозної оцінки теплового поля суднової енергетичної установці із близьким прогнозом температур у контрольних крапках.

Ключові слова: суднова енергетична установка, прогноз теплового поля, близький прогноз, діагностика.

Nemenko A.V., Nikitin M.M. Forecast evaluation of thermal field in marine power plant

The algorithm of thermal field forecast evaluation in ship power plant is offered with the nearest forecast of temperatures in control points.

Keywords: ship power plant, thermal field, nearest forecast, diagnostics.