

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ТЕРМОЭДС ТЕРМОПАР КАК АЛЬТЕРНАТИВА ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Мороз А.С., аспирант

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Тявловский А.К. – канд. тех. наук, доцент

**Аннотация.** Стандартные полиномиальные модели для линеаризации термопар дают систематическую погрешность до  $\pm 0,05$  °С даже при разбиении на поддиапазоны. Рациональные полиномиальные функции снижают ошибку до  $\pm 0,01$  °С, но остаются статическими. В работе предлагается использование многослойного перцептрона (MLP) как альтернативы. Нейросеть обеспечивает единую модель для всего диапазона, потенциальную точность выше 0,001 °С и возможность адаптации под индивидуальные характеристики датчика, что открывает путь к интеллектуальным измерительным каналам.

**Ключевые слова.** Нейросети, MLP, термоЭДС, погрешности измерения температуры,

Термопары широко применяются для измерения температуры благодаря широкому диапазону измерения, надёжности и низкой стоимости. Однако их выходная термоЭДС (ТЭДС) изменяется с температурой лишь приближённо линейно. Для получения точных значений требуется линеаризация – преобразование измеренной ТЭДС в температуру с учётом нелинейности характеристики термопары. Классическим подходом является использование полиномиальных моделей. Для термопары типа К предлагается полином девятого порядка с десятью коэффициентами, причём весь рабочий диапазон разбивается на три поддиапазона, для каждого из которых коэффициенты свои. Аппроксимация исходной зависимости «температура-ТЭДС» для термопар типа К приведена в документе NIST [1], а также в стандартах МЭК 60584, ASTM E230, ITS-90 [2] и ГОСТ Р 8.585-2001. Для преобразования измерения измеренного значения термоЭДС применяется стандартная зависимость ТЭДС термопары от температуры, описываемая степенным рядом (1)

$$E(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n, \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, определяемые материалами электродов.

Несмотря на широкое распространение, стандартные полиномы обладают существенными недостатками. Исходные данные в таблицах округлены до 1 мкВ (обратные таблицы до 1 °С), что вносит погрешность квантования около  $\pm 0,01$  °С. Однако систематическая ошибка самой полиномиальной аппроксимации оказывается значительно больше – до  $\pm 0,03$  °С (рисунок 1). На границах поддиапазонов возникают дополнительные осцилляции, ухудшающие точность.

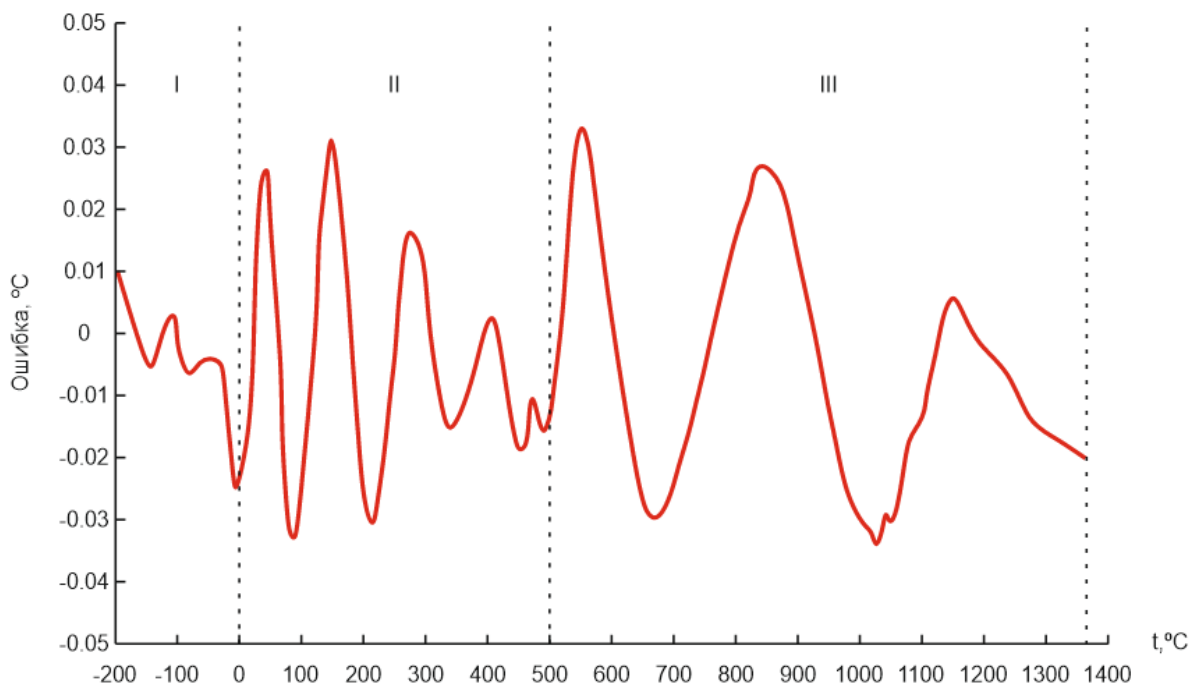


Рисунок 1 — Погрешности измерения температуры, возникающие при применении стандартного полинома 9-го порядка к калибровочным данным термопары типа К. Диапазоны; I от минус 200 °С до 0 °С; II от 0 °С до 500 °С; III от 500 °С до 1372 °С.

Более совершенной альтернативой классическим методам являются рациональные полиномиальные функции – отношение двух полиномов меньших порядков. Такая модель снижает систематическую ошибку до  $\pm 0,01$  °С, что уже меньше погрешности квантования исходных данных, и не требует разбиения на поддиапазоны. Однако и рациональная функция остаётся статической: её коэффициенты рассчитываются один раз по усреднённым табличным данным и не учитывают индивидуальные особенности конкретного датчика, его дрейф или условия эксплуатации.

Альтернативой, позволяющей преодолеть эти ограничения, служат нейронные сети, в частности многослойный перцептрон (MLP) [3]. MLP является универсальным аппроксиматором, способным воспроизводить нелинейные зависимости с произвольно высокой точностью. При обучении на стандартных данных или на реальных экспериментальных измерениях MLP формирует единую для всего диапазона модель, свободную от разрывов на границах поддиапазонов. Благодаря нелинейным функциям активации сеть может улавливать тонкие особенности характеристики, которые не описываются рациональной функцией с фиксированной структурой. На рисунке 2 приведена погрешность, полученная при использовании многослойного перцептрона (MLP). Максимальная ошибка составила  $\pm 0,005$  °С. Теоретически достижимая погрешность может быть снижена до уровня шума измерений (менее 0,001 °С). Кроме того, MLP легко адаптируется под конкретный экземпляр датчика: достаточно провести индивидуальную калибровку и дообучить сеть. После обучения вычисления сводятся к матричным операциям, которые эффективно реализуются даже на микроконтроллерах.

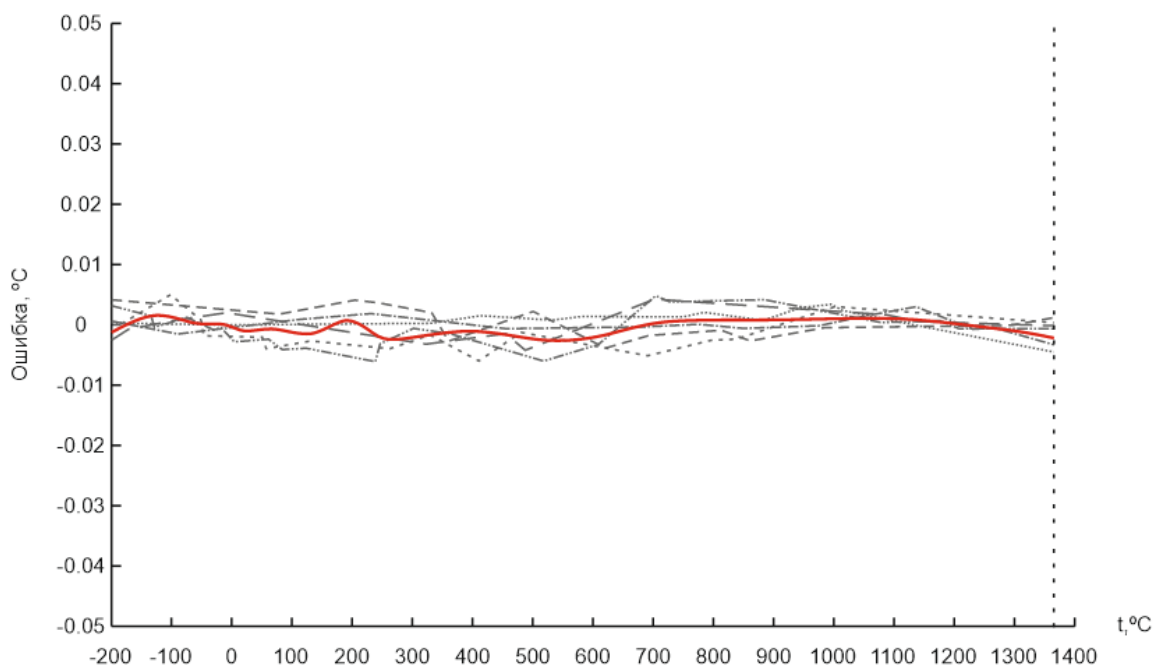


Рисунок 2 – Погрешность аппроксимации характеристики термопары типа К многослойным перцептроном (MLP).

Сравнение методов показывает, что стандартные полиномы дают ошибку  $\pm 0,03$  °С при десяти коэффициентах и разбиении на поддиапазоны; рациональная функция с девятью коэффициентами обеспечивает точность около  $\pm 0,01$  °С; MLP при использовании двух скрытых слоёв (общее число весов – несколько сотен) потенциально способен достичь точности выше 0,001 °С с единой моделью для всего диапазона и возможностью учёта индивидуальных характеристик.

Таким образом, применение нейросетей типа MLP для линеаризации термопар позволяет не только превзойти по точности классические полиномиальные модели, но и получить адаптивный инструмент, пригодный для создания «интеллектуальных» измерительных каналов с самокалибровкой и компенсацией дрейфа. Переход от статических математических аппроксимаций к нейросетевым решениям открывает новые возможности для повышения точности и надёжности термометрических систем.

**Список использованных источников:**

1. NIST Special Publication 250-35. Thermocouple Calibration. URL: <https://www.nist.gov>
2. Preston-Thomas, H., "The International Temperature Scale of 1990 (ITS90). Metrologia 27, 3-10 (1990). DOI:10.1088/0026-1394/27/1/002
3. Almeida, L.B. Multilayer perceptrons, in Handbook of Neural Computation, IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997. URL: <https://www.lx.it.pt/~lbalmeida/papers/AlmeidaHNC.pdf>