

УДК 629.5.062.3

О КАЛИБРОВКЕ ТЕРМОПАР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕД В СИСТЕМАХ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Шураев Олег Петрович¹, доцент, кандидат технических наук

e-mail: solwrk@inbox.ru

Шураев Глеб Олегович², учащийся

e-mail: solwrk@inbox.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

² МБОУ «Школа 121», Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Рассмотрена методика калибровки хромель-алюмелевых термопар (типа К) для измерения температуры жидких и газовых сред в системах судовой энергетической установки. Экспериментально установлено, что изначально измеренные значения температуры в реперных точках могут отличаться от действительных значений, и в некоторых случаях отклонение выходит за пределы допустимой погрешности измеряемого параметра судовой энергетической установки. Приведена программная коррекция показаний термопары на основе калибровочной зависимости.

Ключевые слова: измерение температуры, термопара, калибровка.

ABOUT CALIBRATION OF THERMOCOUPLES FOR MEASURING THE TEMPERATURE OF LIQUID AND GAS IN MARINE POWER PLANT SYSTEMS

Shurayev Oleg Petrovich¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

email: solwrk@inbox.ru

Shurayev Gleb Olegovich², School Student

e-mail: solwrk@inbox.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

² School 121, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The method of calibration of chromel-alumel thermocouples (type K) for measuring the temperature of liquid and gas media in systems of a marine power plant is considered. It has been experimentally shown that the error in determining the temperature at the reference points may differ from the actual values, in some cases going beyond the permissible error of the measured parameter of the ship's power plant. The software correction of the thermocouple readings based on the calibration dependence is given.

Keywords: temperature measurement, thermocouple, calibration technique.

Задача измерения температуры весьма часто возникает для различного судового оборудования. Если посмотреть на количество разных приборов в штатном комплекте измерительной аппаратуры судовых дизелей, то термометры со значительным отрывом займут первое место. Так, в практике эксплуатации судовых дизелей и их систем требуется измерение температуры воды и масла в диапазоне $0 \dots 100^\circ\text{C}$ с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$ для масла и $\pm 4^\circ\text{C}$ для воды, а температуры продуктов сгорания на выходе из цилиндра в диапазоне $0 \dots 600^\circ\text{C}$, с точностью $\pm 25^\circ\text{C}$ [1].

Оборудование СЭУ предыдущих поколений оснащались чаще всего аналоговыми контрольно-измерительными приборами со считыванием показаний непосредственно со шкалы. Современные измерительные системы чаще всего являются преобразователями исходного сигнала в электрический. Применительно к измерению температуры такие приборы являются термоэлектрическими преобразователями. Причем для надежной передачи полученной информации в центральный пост управления целесообразна ее оцифровка как можно ближе к источнику и дальнейшие манипуляции с ней уже в цифровом виде.

Этот принцип реализован в измерительной системе, состоящей из хромель-алюмелевых термопар (тип К) в гильзах из нержавеющей стали, являющихся термоэлектрическими преобразователями, модулей МТ оцифровки сигнала и блока регистрации измерений БРИЗ. Поскольку после модуля МТ сигнал передается в цифровой форме, то обеспечение точности измерений будет зависеть от работы термопары.

Действие термопары основано на эффекте Зеебека: возникновении тока в замкнутой цепи из двух разнородных проводников при наличии градиента температур между спаями. Термопары типа К представляют собой хромель-алюмелевый спай (рисунок 1).

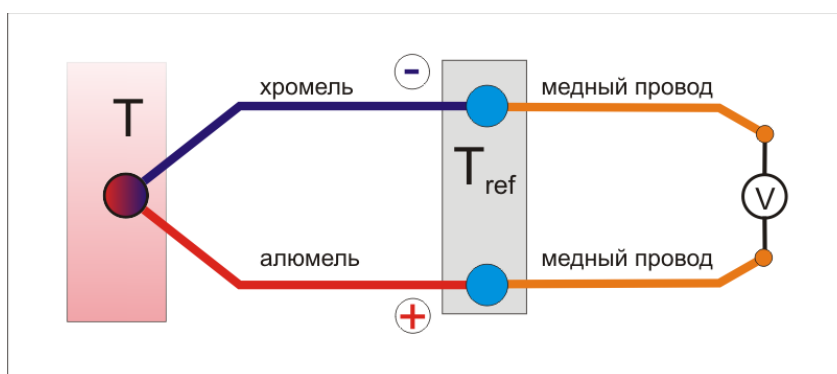


Рисунок 1 – Схема измерения температуры с помощью термопары

Чтобы получить желаемое измерение температуры T , недостаточно просто измерить напряжение V . Температура в опорных соединениях T_{ref} должна быть также известна. Для ее определения часто используются две стратегии:

Метод "ледяной ванны": опорный соединительный блок погружают в полужамерзшую ванну с дистиллированной водой при атмосферном давлении. Точная температура фазового перехода точки плавления действует как естественный термостат, фиксируясь на 0°C .

Эталонный датчик соединения (известный как "компенсация холодного спая"): опорный соединительный блок может иметь произвольную температуру, но температура измеряется в этом блоке с помощью отдельного датчика температуры. Это вторичное измерение используется для компенсации изменения температуры в соединительном блоке.

Другой сложностью, затрудняющей прямое подключение термопар, являются малые значения термоЭДС. Так при разности температуры «горячего» и «холодного» спая 100°C для термопары типа К эталонное значение термоЭДС составляет $4,096\text{ мВ}$ [2].

Модуль на микросхеме MAX6675 оцифровывает сигнал с термопары типа К и выполняет компенсацию холодного спая. Данные выводятся в формате только для чтения, совместимом с SPI, с разрешением 12 бит. Этот преобразователь позволяет получать показания температур в диапазоне от 0°С до +700°С и обеспечивает дискретность измерения температуры 0,25°С [3].

Из-за погрешностей изготовления, соединений и компенсации холодного спая показания термопар отличаются от эталонных, и при использовании термопар в термоизмерительных системах требуется их предварительная калибровка.

В технологии калибровки температуры существует два метода: сравнительная калибровка и калибровка по фиксированной точке. Используемый метод калибровки будет определяться требованиями к точности и типом испытательного прибора.

Сравнительная калибровка выполняется путем сравнения тестируемого термометра с эталонным термометром более высокого класса точности. Оба термометра помещаются в один однородный источник температуры. В качестве источника температуры обычно используются жидкостные ванны. При размещении термометров следует обеспечить минимальное расстояние между ними, так чтобы чувствительные точки (то есть точки измерения) располагались как можно ближе, но не касаясь друг друга и стенок ванны.

Калибровка с фиксированной точкой, в отличие от сравнительной калибровки, выполняется по определенным тройным точкам, точкам застывания и плавления, указанным в Международной шкале температур 1990 года (ITS-90) [4]. Фиксация температуры в большинстве определенных точек основана на фазовом переходе, в частности, на температуре плавления/ затвердевания чистого химического элемента. Для ртути и воды использованы тройные точки, где физическое состояние постоянно меняется между паром, твердой и жидкой фазами.

Таблица 1

**Калибровочные фиксированные точки в диапазоне от -39 до 660°С
в соответствии с ITS-90**

Фиксированная точка	Температура, °С
Тройная точка ртути	-38.8344
Тройная точка воды	0.01
Температура плавления галлия	29.7646
Температура замерзания индия	156.5985
Температура замерзания олова	231.928
Температура замерзания цинка	419.527
Температура замерзания алюминия	660.323

Как правило, с ячейками с фиксированной точкой работают только национальные лаборатории, обеспечивающие очень малые погрешности измерений, поскольку оборудование для калибровки является весьма дорогостоящим. Платиновые термометры сопротивления, которые будут использоваться в качестве эталонных термометров, калибруются с использованием метода фиксированной точки. Эталонный датчик вставляется в закрытую или открытую ячейку с фиксированной точкой, которая поддерживает постоянную температуру в течение длительного периода.

Для системы мониторинга температуры в элементах СЭУ не требуется прецизионная точность измерения, и задание фиксированных точек может быть упрощено. С другой стороны, описанные методы могут быть использованы при проведении калибровки термопар. В качестве первой фиксированной точки используем температуру плавления льда (0°С), а второй – температуру кипения воды (98,9 ... 100,4°С при давлении 97,5 ... 103,0 кПа [5]). Температура плавления льда практически не зависит от давления, а диапазон



изменения температуры кипящей воды в зависимости от давления составляет всего 1,5°C для возможных значений атмосферного давления, что является вполне приемлемым с точки зрения точности калибровки по фиксированной точке, и, безусловно приемлемым при дополнительном контроле с помощью термометра более высокого класса точности. Такими термометрами служили жидкостные термометры ТТЖ-М исп. 5П и ТН-1 с ценой деления 1°C. Нулевая температура устанавливалась в сосуде, наполненном смесью дробленого льда и воды, а температура кипения – при медленном нагревании сосуда газовой горелкой.

Особенности калибровки рассмотрим термопар на примере блока БРИЗ-ТИ2. Блок БРИЗ-ТИ2 совместно с модулем МТ02, оснащенный двумя платами на базе микросхемы MAX 6675 для оцифровки сигнала с термопар типа К, предназначенных для измерения температуры воды на входе (ТЛТ) и выходе (ТНТ) электронагревателя.

Показания термопар при плавлении льда и кипении воды для некалиброванных термопар показано на рисунке 2.

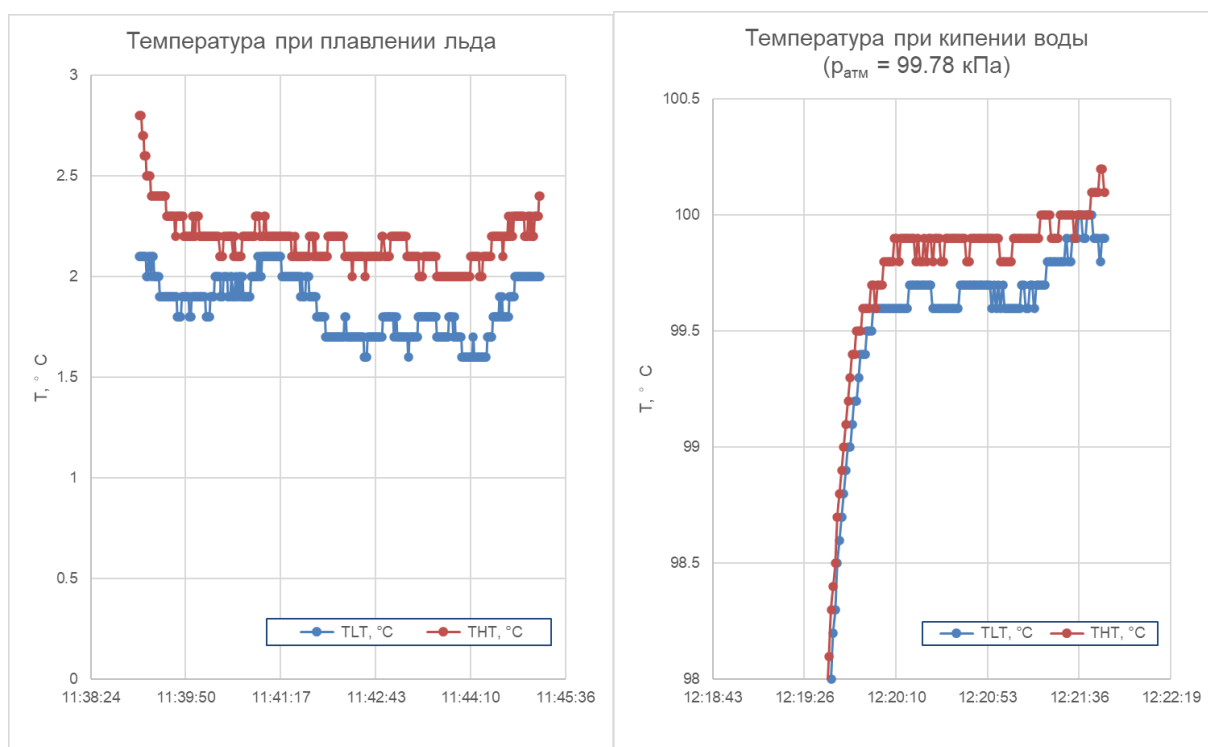


Рисунок 2 – Исходные показания термопар

Средние значения температур, полученных с термопар, при кипении воды практически не отличаются от теоретических (99,7°C при атмосферном давлении 99,8 кПа) и контрольных, измеряемых термометром. А при плавлении льда термопары синхронно определяют температуру примерно на 2°C выше действительной (табл. 2).

Таблица 2

Результаты первичных измерений температуры

Контрольная температура, °C	Показания термопары, °C		Отклонение значения температуры от контрольной, °C	
	ТЛТ	ТНТ	ТЛТ	ТНТ
0	1.85	2.18	-1.85	-2.18
99.7	99.72	99.92	-0.02	-0.22

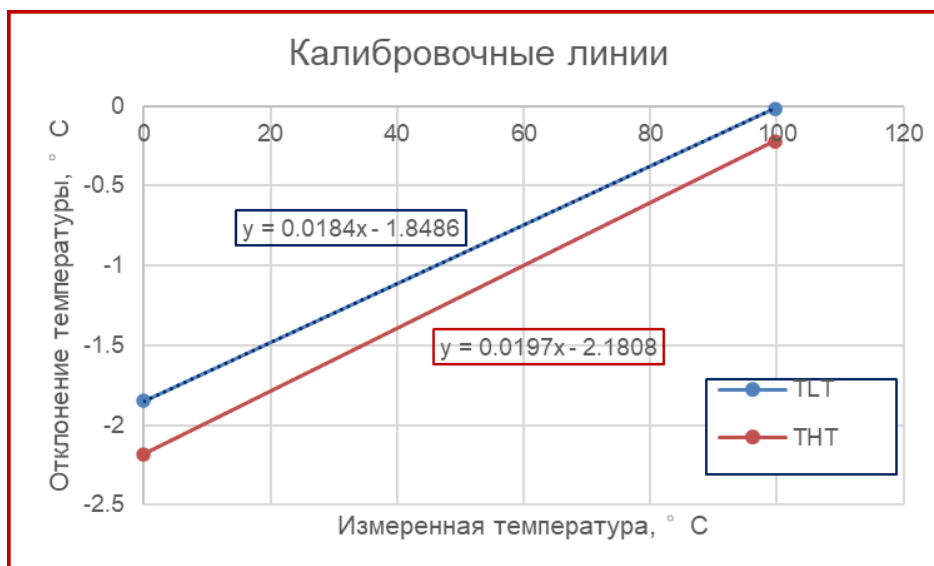


Рисунок 3 – Калибровочные линии

Вообще говоря, полученный на данном этапе результат уже можно признать удовлетворительным: рассматриваемые термопары обеспечивают требуемую точность измерения температуры для систем смазывания и охлаждения двигателя. Но так происходит не всегда, и есть возможность программным путем скорректировать показания термопар, для чего по данным таблицы 2 построим калибровочные линии: значения поправки в зависимости от температуры, которую нужно прибавить к показаниям термопар. Фрагмент программного кода представлен на рисунке 4.

```
// -V----- Измерение температуры -----
// --- V -- Температура воды -----калибровочный файл 24-05-06-A0.xlsx -- от 06.05.2024 -----
t1=thermocouple1.readCelsius();
t1 = t1 + (0.0184*t1 - 1.8486); // --! -> Температура после применения калибровочных уравнений
temperature01 =(temperature01*(1-TCF))+(t1*TCF);
delay(100);
t2=thermocouple2.readCelsius();
t2 = t2 + (0.0197*t2 - 2.1808); // --! -> Температура после применения калибровочных уравнений
temperature02 =(temperature02*(1-TCF))+(t2*TCF);
delay(100);
// --- ^ -- Температура воды -----калибровочный файл 24-05-06-A0.xlsx -- от 06.05.2024 -----
```

Рисунок 4 – Фрагмент программного кода измерения и коррекции температуры

Проверка, проведенная прямым измерением температуры в сосуде, наполненном смесью дробленого льда и воды, показала, что значения, получаемые с термопар, отличаются от действительного 0°C на величину, не превышающую 0,2°C, что следует признать весьма хорошим результатом (рис. 5).



Рисунок 5 – Показания термопар при плавлении льда с учетом калибровочной зависимости

Выводы

1. Термопары типа К в сочетании с модулем оцифровки MAX 6675 являются недорогим техническим решением в системах измерения и мониторинга температуры для различных объектов судовой энергетической установки.
2. Без калибровки показания термопар могут отличаться от действительных значений, в некоторых случаях выходя за пределы допустимой погрешности измеряемого параметра судовой энергетической установки.
3. Рассмотренная методика выполнения калибровки позволяет получить зависимость, приводящую показания термопар к действительным значениям температуры.

Список литературы:

1. ГОСТ 10448-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Приемка. Методы испытаний: Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2015.
2. ГОСТ 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования: Государственный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2010.
3. Международной шкале температур 1990 года (ITS-90) Реперные точки МТШ-90 (основные, вторичные, специальные). – URL: https://temperatures.ru/pages/repurnye_tochki_mtsh_90 (дата обращения: 22.04.2024)
4. MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocoupleto-Digital Converter. – URL: <https://robotchip.ru/download/datasheet/MAX6675-datasheet.pdf> (дата обращения: 23.12.2023)
5. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. - М.: Изд. дом «МЭИ». 2009. - 224 с.