

УДК 536.5

Экспериментальное исследование явлений нестационарной теплопроводности на основе программных и аппаратных средств Arduino

Шевелев Денис Владимирович¹

denis.v.shevelev@bmstu.ru

Апокин Игорь Александрович¹

apokinia@student.bmstu.ru

Федин Роман Русланович¹

fedinrr@student.bmstu.ru

Олейников Павел Владимирович²

oleinikov_pv@paoktz.ru

¹ КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия² ПАО «Калужский турбинный завод», Калуга, Россия

Приводится описание и принцип работы экспериментального стенда по изучению нестационарной теплопроводности. На базе платформы Arduino собрана аппаратная часть для измерения температуры опытного образца экспериментального стенда. Разработан программный код прошивки микроконтроллера Arduino, позволяющая осуществлять опрос датчиков температуры, обработку их показаний и передачу данных на ПК. Разработана прикладная программа для визуализации данных, характеризующих процесс нестационарной теплопроводности.

Ключевые слова: нестационарная теплопроводность, термонара, Arduino, MAX6675

Явление нестационарной теплопроводности играют важную роль в процессах, протекающих в паротурбинных установках (ПТУ). Так, в массивных элементах конструкции паровых турбин, в момент запуска и останова, возможно возникновение термических напряжений, которые могут достигать критических значений и приводить к разрушению деталей. Кроме того, несогласованные термические расширения ротора и статора турбины могут привести к выборке радиальных зазоров и повреждение лабиринтных уплотнений и даже заклиниванию ротора [1]. Для уменьшения термических напряжений и согласования термических расширений корпуса и статора паровой турбины используют различные приемы, например паровой обогрев фланцев [2].

Для успешного прохождения процедуры запуска турбины, необходим непрерывный мониторинг теплового состояния ее ключевых корпусных деталей. Он осуществляется с помощью системы температурных датчиков, работающих в составе системы автоматического управления (САУ) ПТУ, включающей в себя, помимо первичных датчиков, аналого-цифровые преобразователи, промышленные компьютеры и специализированное программное обеспечение [3].

Учебной альтернативой может стать создание стенда по изучению нестационарных теплопроводности на базе программно-аппаратной платформы Arduino.

Основными компонентами платформы Arduino являются плата ввода-вывода на базе микроконтроллера ATmega328P и среда разработки Arduino-IDE на языке Processing/Wiring [4].

Плата Arduino обладает богатым набором цифровых и аналоговых входов/выходов, последовательным портом стандарта RS-232, последовательным интерфейсом SPI.

Самый простой способ измерения температуры с помощью Arduino — это использование температурных датчиков сопротивления — полупроводниковых термисторов. В этом случае, Arduino конфигурируется в режим потенциометра с измерением параметров тока в электрической схеме делителя напряжения с термистором в качестве одного плеча [5]. Термисторы позволяют с высокой точностью измерять температуру, однако верхний предел ее измерения их ограничен 150–200 °С. Более универсальны — термоэлектрические датчики (термопары). Они не требуют дополнительного питания, отличаются стабильностью характеристик, пригодны для измерения высоких температур [6]. Недостатком термопар является очень слабый генерируемый сигнал (десятки милливольт), поэтому использовать аналоговые входы Arduino для точного измерения температуры не представляется возможным. Однако подключение термопары возможно через промежуточный интерфейс — модуль MAX6675, выполняющий функцию усилителя напряжения термопары, перевода его в цифровую форму и осуществляющий функцию компенсатора холодного спая [7]. Подключение MAX6675 к Arduino осуществляется по интерфейсу SPI. Количество цифровых входов/выходов Arduino UNO позволяет подключить до 12 модулей MAX6675 и, соответственно, термопар. Для изучения процессов нестационарной теплопроводности был создан экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 1.

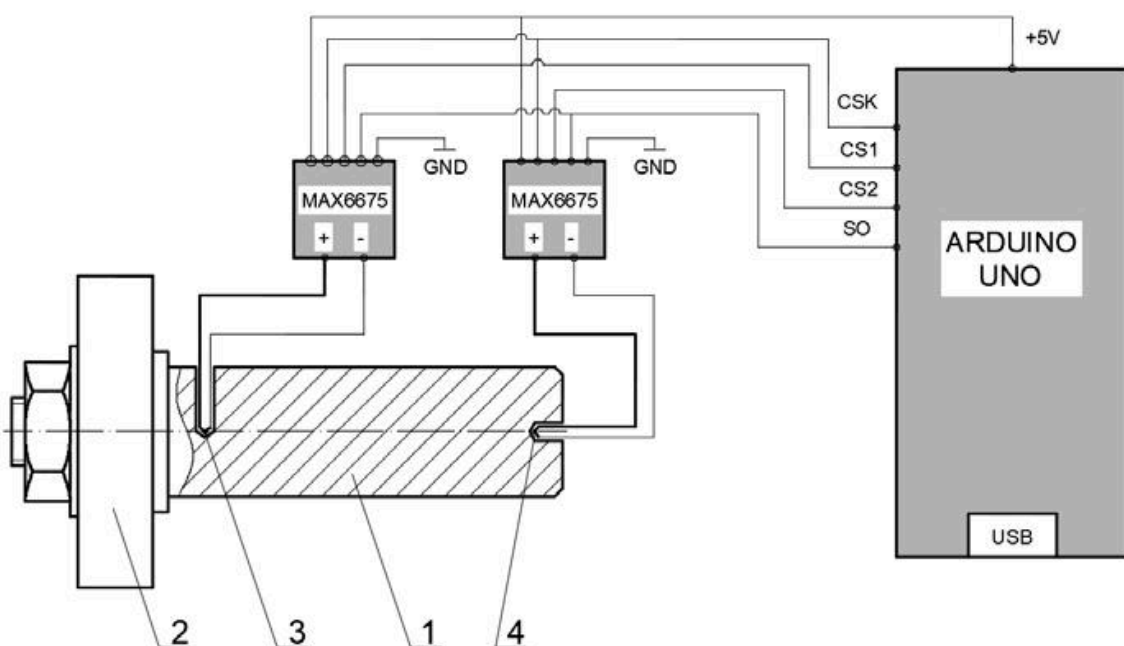


Рис. 1. Схема экспериментального стенда по изучению нестационарной теплопроводности

Рабочим участком экспериментального стенда является металлический цилиндрический стержень 1, одним торцом он соединяется с нагревательным элементом 2, второй конец — свободный. Стержень — препарированный. В него установлены две хромель-копелевые термопары. Первая (3), через отверстие в боковой стенке, установлена на оси цилиндра у нагреваемого торца, вторая (4) — на оси цилиндра, у свободного торца. Выводы термопар подключаются к двум модулям MAX 6675, а те, в свою очередь, к цифровым входам/выходам Arduino.

Разработанная программная прошивка микроконтроллера Arduino осуществляет циклический опрос термопар, время преобразования аналогового сигнала модулем MAX6675 составляет 220 мс, что достаточно для исследования нестационарных процессов теплопроводности в массивных деталях. Для облегчения написания программного кода, была использована библиотека GyverMAX6675 для драйвера модуля MAX6675 [8].

Регистрация и визуализация показаний термопар осуществляется на персональном компьютере, куда данные передаются с микроконтроллера по виртуальному последовательному интерфейсу (COM) по шине USB. Для этого была разработана прикладная программа на языке программирования Object Paskal в IDE Lazarus [9]. Программное сопряжение Arduino с программой сбора и визуализации данных осуществлялось с помощью модуля Synaser [10].

Визуализация показаний термопар осуществлялась с помощью оконного приложения. С периодичностью в одну секунду выводились текущие значения температуры и строился график функции $t_1, t_2 = f(\tau)$.

Пример работы разработанной программы приведен на рис. 2.



Рис. 2. Пример регистрации параметров процесса нестационарной теплопроводности в разработанной программе

Графическое представление данных позволяет определить базовые параметры процесса нестационарной теплопроводности.

1. Время неупорядоченного режима нестационарного нагрева стержня ($\tau = 20$ с), когда скорость изменения температуры в отдельных точках исследуемого объекта различна.

2. Время регулярного режима нестационарной теплопроводности ($\tau = 180$ с), когда относительная скорость изменения температуры во всех точках тела становится постоянной.

3. Время выхода на стационарный режим ($\tau = 240$ с) с постоянным распределением температуры в теле.

В рамках дальнейших работ, планируется:

- разработка программного алгоритма автоматического распознавания временных характеристик процессов нестационарной теплопроводности;

- разработка методики вычисления теплового потока в стержне в процессе эксперимента;

- архивация данных эксперимента сохранением в файл в формате электронной таблицы.

Выводы. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд по изучению нестационарной теплопроводности. Собрана на базе платформы Arduino аппаратная часть для измерения температуры опытного образца экспериментального стенда. Разработан программный код прошивки микроконтроллера Arduino, позволяющая осуществлять опрос датчиков температуры, обработку их показаний и передачу данных на ПК. Разработана прикладная программа для визуализации данных, характеризующих процесс нестационарной теплопроводности.

Литература

- [1] Сафонов Л.П., Селезнев К.П., Коваленко А.Н. *Тепловое состояние высокоманевренных паровых турбин*. Ленинград, Машиностроение, 1983.
- [2] Иоффе Л.С., Коротенко В.В. *Эксплуатация теплофикационных паровых турбин*. Екатеринбург, Уральский рабочий, 2002, 160 с.
- [3] Плаксин И.К., Алимжанова З.Х., Бережной Н.А. Типовое решение: Система автоматического управления электрогидравлической системой регулирования (ЭГСР) паровой турбины на базе отечественного ПТК. *Автоматизация и IT в энергетике*, 2021, № 4 (141), с. 2–7.
- [4] *Официальный сайт проекта Arduino*. URL: <https://www.arduino.cc/> (дата обращения 04.11.2024).
- [5] Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В., Назаров Е.С. Создание системы измерений теплофизических параметров на основе аппаратных и программных средств Arduino. *Системный администратор*, 2021, вып. № 09 (226), с. 82–85.
- [6] Данишевский С.К. *Высокотемпературные термонары*. Москва, Металлургия, 1977, 232 с.
- [7] MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter. URL: <https://datasheet.dip8.ru/b568d0562f2eb0bdc508c175399e85.pdf> (дата обращения 04.11.2024).
- [8] *Библиотека GyverMAX6675*. URL: <https://github.com/GyverLibs/GyverMAX6675> (дата обращения 04.11.2024).

- [9] *Открытая среда программного обеспечения Lazarus*. URL: <https://www.lazarus-ide.org/> (дата обращения 04.11.2024).
- [10] Ararat Synpse Code. URL: <https://sourceforge.net/p/synalist/code/HEAD/tree/trunk/> (дата обращения 04.11.2024).

Experimental study of the phenomena of unsteady thermal conductivity based on Arduino software and hardware

Shevelev Denis Vladimirovich¹

denis.v.shevelev@bmstu.ru

Apokin Igor Alexandrovich¹

apokinia@student.bmstu.ru

Fedin Roman Ruslanovich¹

fedinrr@student.bmstu.ru

Oleinikov Pavel Vladimirovich²

oleinikov_pv@paoktz.ru

¹ *BMSTU (KB), Kaluga, Russia*

² *Kaluga Turbine Plant PJSC, Kaluga, Russia*

The description and principle of operation of the experimental stand for the study of non-stationary thermal conductivity are given. The hardware for measuring the temperature of the prototype of the experimental stand has been assembled on the basis of the Arduino platform. The software code for the firmware of the Arduino microcontroller has been developed, which allows polling temperature sensors, processing their readings and transferring data to a PC. An application program has been developed to visualize data characterizing the process of non-stationary thermal conductivity.

Keywords: non-stationary thermal conductivity, thermocouple, Arduino