**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

**ФЕТТ – КАТЕДРА ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА**

**ДИПЛОМНА РАБОТА**

Тема:

Регистриране на високоскоростен температурен процес във вътрешността на човешка кожа

Студент: Ръководител:

Илиян Антов ас. Николай Тюлиев

Фак. №: 101220020

София

2024 г.

**Съдържание**

[1. Увод 3](#_Toc163230352)

[2. Литературно проучване 5](#_Toc163230353)

[2.1. Контактни и безконтактни температурни сензори 5](#_Toc163230354)

[2.2. Видове контактни температурни сензори 7](#_Toc163230355)

[2.2.1. Термистори 7](#_Toc163230356)

[2.2.2. RTD сензори 8](#_Toc163230357)

[2.2.3. Полупроводникови сензори 10](#_Toc163230358)

[2.2.4. Термодвойки 11](#_Toc163230359)

[2.2.5. Сравнение между различните видове сензори 12](#_Toc163230360)

[2.3. Съществуващи решения 14](#_Toc163230361)

[2.4. Заключение: 18](#_Toc163230362)

[3. Техническо задание 18](#_Toc163230363)

[3.1. Цел и предназначение 18](#_Toc163230364)

[3.2. Принцип на работа 18](#_Toc163230365)

[3.3. Параметри (характеристики) 19](#_Toc163230366)

[4. Блокова схема 20](#_Toc163230367)

[5. Принципна електрическа схема 20](#_Toc163230368)

[6. Алгоритъм на работа 20](#_Toc163230369)

[7. Резултати 20](#_Toc163230370)

[8. Заключение 20](#_Toc163230371)

[9. Използвана литература 21](#_Toc163230372)

# Увод

Измерването на температурата на даден обект е важен, но сложен процес. Съществуват множество сензори и устройства, предназначени за тази цел – битови термометри с различни предназначения (за измерване на околна температура, за измерване на температурата на човек, готварски термометри и т.н.), електронни сензори за температура[1] (термистори, резистивни сензори (Resistance Temperature Detectors – RTDs), полупроводникови сензори, термодвойки), безконтактни камери и сензори за инфрачервено излъчване и др. Всички те имат своите предимства и недостатъци, свързани с тяхната точност, температурен обхват, цена, метод за отчитане и т.н.

В медицината, измерването на температурата на човешкото тяло е от изключителна важност. В днешни дни, една от много популярните естетически процедури за стягане на кожата е свързана с подкожно загряване на тъкан посредством радиочестотен (radiofrequency – RF) ток[2]. Резултатът от терапията е пряко свързан с температурата, до която е загрята тъканта – зависимостта на терапевтичния ефект спрямо температурата е много добре изследвана и дефинирана. Нуждата от изследване на достигнатата температура по време на терапията обаче е свързанa с множество проблеми:

* Измерването на температура обикновено е много бавен и инертен процес (от порядъка на няколко секунди до няколко минути), а загряването с RF ток е сравнително бърз процес (от порядъка на няколко десетки ms), като освен това е важно да се знае и как е протекъл процеса по загряване, т.е. може да е нужно отчитане на температура дори в рамките на μs;
* Терапията с RF ток се случва подкожно, което прави измерването с повечето оптични сензори невъзможно;
* Големият RF ток, използван за загряване на тъканта, по отношение на термо сензорите се явява шум с много голяма амплитуда, който е необходимо да бъде филтриран.

Настоящата дипломна работа има за цел разработването на устройство за високоскоростно подкожно измерване на температурата на човешка тъкан, загрята посредством RF ток. Ще бъдат разгледани различни сензори за измерване на температура, като ще бъде направено сравнение между тях и ще бъде подбран най-подходящият. Ще бъдат дефинирани точни изисквания към разработваното устройство и към софтуера за обработка и визуализация на получената от него информация. Ще бъде разработена електрическа схема, снемаща информация от температурния сензор с висока скорост и изпращаща съответната информация към компютър. Ще бъде разработена печатна платка на устройството. Ще бъде разработен компютърен софтуер, който обработва данните, получени от регистриращото устройство и посредством необходимите изчисления изчертава графика на протеклия температурен процес за определен период от време. Цялата система ще бъде реализирана и вкарана в употреба.

# Литературно проучване

Процесът по проектиране на устройството е свързан с решаването на няколко основни проблеми:

* Избор на подходящ температурен сензор с възможно най-голямо бързодействие;
* Филтрация на шума, предизвикан от RF тока, използван за загряване на тъканта;
* Разработка на подходящ алгоритъм, който обработва и визуализира информацията от температурния сензор.

Проблемът с филтрацията може да бъде решен схемотехнично, тъй като параметрите на RF шума са добре известни. Алгоритъмът за обработка на информацията ще бъде реализиран софтуерно във вид на компютърно приложение, тъй като това ще позволи прилагането на множество вторични обработки – цифрови филтри, алгоритми за забързване на термосензора, настройка спрямо реалните условия и т.н.

Най-важното решение, което трябва да бъде взето преди пристъпване към проектиране на устройството, е подбор на най-подходящия вид температурен сензор. В следващите точки са разгледани някои от основните видове температурни сензори и е направено сравнение между тях.

## Контактни и безконтактни температурни сензори[3][4]

Най-общо, електронните температурни сензори могат да се разделят в две групи – контактни и безконтактни. Измерването при контактните сензори става чрез директен допир с измервания обект, като резултатът от измерването се получава след отчитане на пренесената между обекта и сензора топлинна енергия. Безконтактните сензори се базират на измерване на инфрачервената светлина, излъчвана от измервания обект - те са известни също и като инфрачервени (infrared – IR) сензори.

Примери за безконтактни сензори са пирометрите, термокамерите и термометрите с оптични влакна (fiber optic thermometers). Принципът на работа на всеки от тях е много подобен – отчитане на инфрачервеното лъчение, попаднало върху чувствителния елемент на сензора:

* Пирометрите се използват при нужда от дистанционно отчитане на високи температури в една точка от повърхността на даден обект. Сравнително ниската цена и лесната употреба ги прави популярен избор при измервания в индустрията;
* Термокамерите съдържат матрица от чувствителни елементи (пиксели), което позволява изграждането на двуизмерна картина, показваща как е разпределена топлината на повърхността на дадено тяло. Висока цена, но изключително подходящи за изследване на процесите по нагряване и охлаждане на електронни, механични и други видове устройства. Намират широко приложение в научно-изследователската и развойна дейност;
* Термометрите с оптични влакна разполагат с чувствителен елемент, прикрепен към оптично влакно[5]. Това дава много по-голяма свобода при разполагането на сензора и ги прави подходящи за извършване на измервания в иначе трудно достъпни места. Тъй като този вид сензори са напълно електрически изолирани (сигналът се носи от оптичното лъчение), те могат да се използват и в силно шумящи среди.

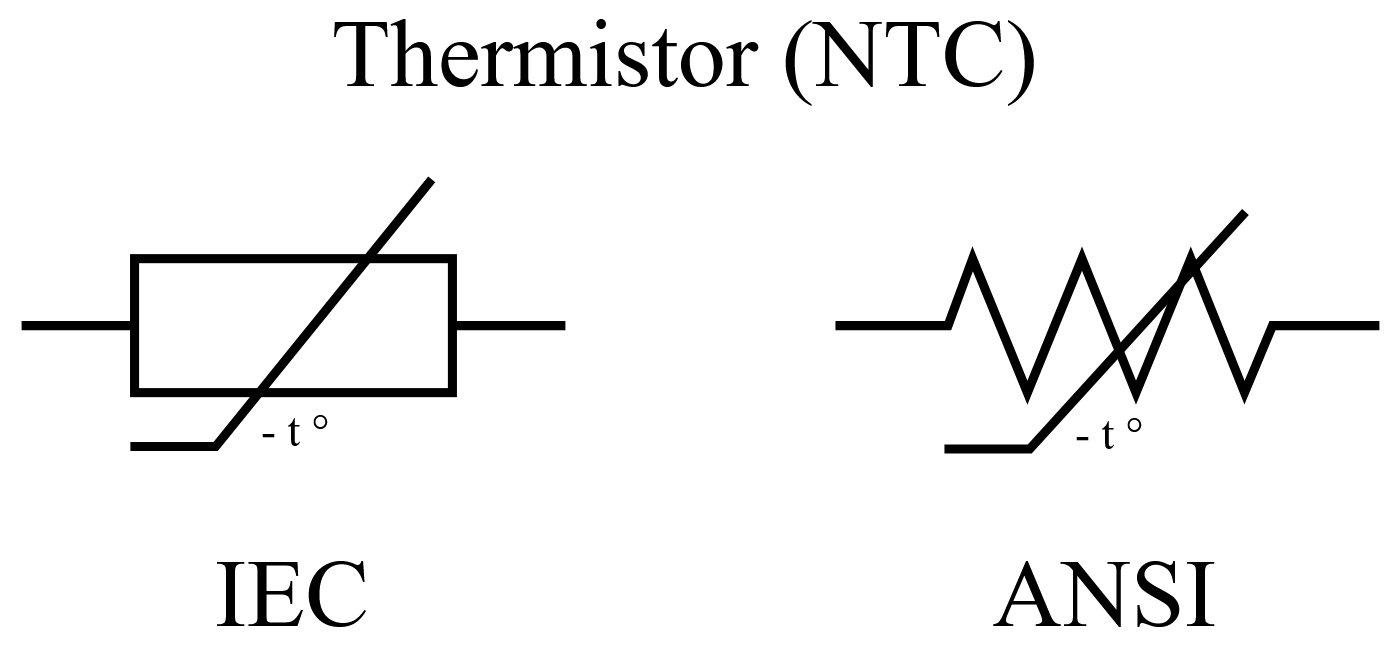
Поставеното към проектираното устройство изискване за подкожно измерване на температура изключва използването на пирометри и термокамери, тъй като те могат да се използват само при измерване на повърхностна температура. Термометрите с оптични влакна позволяват имплантирането на чувствителния елемент във вътрешността на кожата, което ги прави единствения възможен кандидат от безконтактните сензори. Те обаче имат други недостатъци, най-проблемни от които са високата цена и сложността на снемане на информацията от сензора. Поради специфичната им конструкция, преобразуването и отчитането на сигнала се извършва от готови устройства с определени параметри и ограничения. Въпреки че някои от тези устройства са много бързи (от порядъка на няколко ms за един отчет), тяхната скорост все пак не е достатъчна за точно отчитане на развитието на температурния процес във времето, а специфичната им конструкция прави прилагането на алгоритми за корекция и забързване на измерването много трудно.

Другият вид сензори за температура са т.нар. контактни сензори. Тяхната конструкция обикновено е значително по-проста, по-евтини са и методите за отчитане на информацията от тях са добре изследвани и дефинирани. Най-разпространените сензори от този вид са термисторите, RTD сензорите, полупроводниковите сензори и термодвойките. Подробна информация за всеки вид и сравнение между тях е дадена в следващата точка.

## Видове контактни температурни сензори[6][7][8]

### Термистори

Термисторите са пасивни елементи, които променят съпротивлението си спрямо температурата. Те обикновено се правят от полимерен или керамичен материал. Съществуват два вида термистори – с отрицателен температурен коефициент (negative temperature coefficient – NTC) и с положителен температурен коефициент (positive temperature coefficient – PTC), като първите намаляват съпротивлението си при увеличаване на температурата, а вторите – обратно. На фиг. 2.2.1. са показани стандартните конфигурации, в които се предлагат повечето термистори, както и стандартните схемни символи за този вид елементи.



**Фиг. 2.2.1.** Схемни символи и стандартни конфигурации и термистор

**Предимства** на термисторите:

* Висока чувствителност;
* Сравнително бързи (в зависимост от конструкцията);
* Евтини;
* Измерването става само с 2 проводника.

**Недостатъци**:

* Силно нелинейни;
* Ограничен температурен обхват (-100°C до +500°C);
* Нуждаят се от стабилен източник на напрежение;
* Самонагряват се.

### RTD сензори

Резистивните температурни сензори (RTD сензорите) са много подобни на термисторите – информацията за измерената температура се носи от съпротивлението на сензора. Главната разлика е че RTD сензорите се правят от чисти метали – най-често платина, като съпротивлението на сензора зависи от количеството материал върху него и е необходима много точна калибрация по време на изработката му, а и периодично след това. При измерването с такъв вид сензори обикновено се налага прилагане на 3- или 4-проводна схема за да се компенсират съпротивленията на свързващите проводници, които внасят значителни шумове в измерваното когато сензорът е разположен на разстояние от измервателния апарат поради сравнително ниското съпротивление на самия сензор. На фиг. 2.2.2. е показан стандартен сензор от типа PT100, което е най-широко разпространения RTD сензор на пазара в днешни дни.



**Фиг. 2.2.2.** RTD сензор от типа PT100

**Предимства** на RTD сензорите:

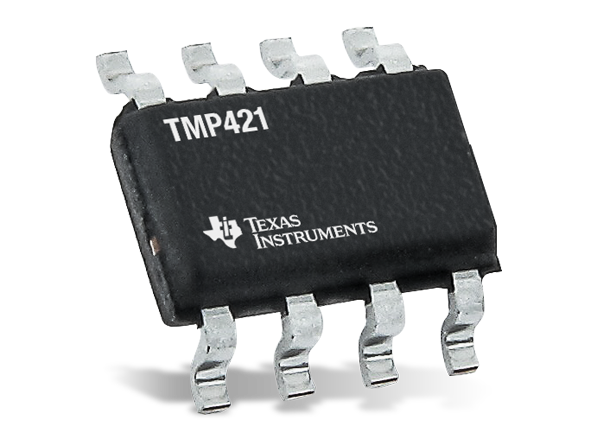
* Висока стабилност и точност;
* Висока линейност;
* Сравнително широк температурен обхват (-240°C до +600°C).

**Недостатъци**:

* Обикновено доста бавни поради голямата им топлинна маса;
* Малка чувствителност;
* Често се налага използването на повече от 2 проводника;
* Нуждаят се от стабилен източник на ток;
* Самонагряват се.

### Полупроводникови сензори

Полупроводниковите (още наречени интегрални – IC) температурни сензори използват добре познатата зависимост на широчината на забранената зона на силиция от температурата. Измерването обикновено се получава като с прецизен източник на ток се захрани p-n преход свързан в права посока и се отчете падът на напрежение върху него. Измерването с такива сензори обикновено е много лесно – информацията за температурата се получава в готов вид като аналогов (напрежение или ток) или цифров (SPI, I2C, SMBus и др.) сигнал, като предварителната обработка се извършва от самия сензор. На фиг. 2.2.3. е показан полупроводников сензор в стандартен корпус за повърхностен монтаж върху печатна платка.



**Фиг. 2.2.3.** Полупроводников температурен сензор TMP421

**Предимства** на полупроводниковите сензори:

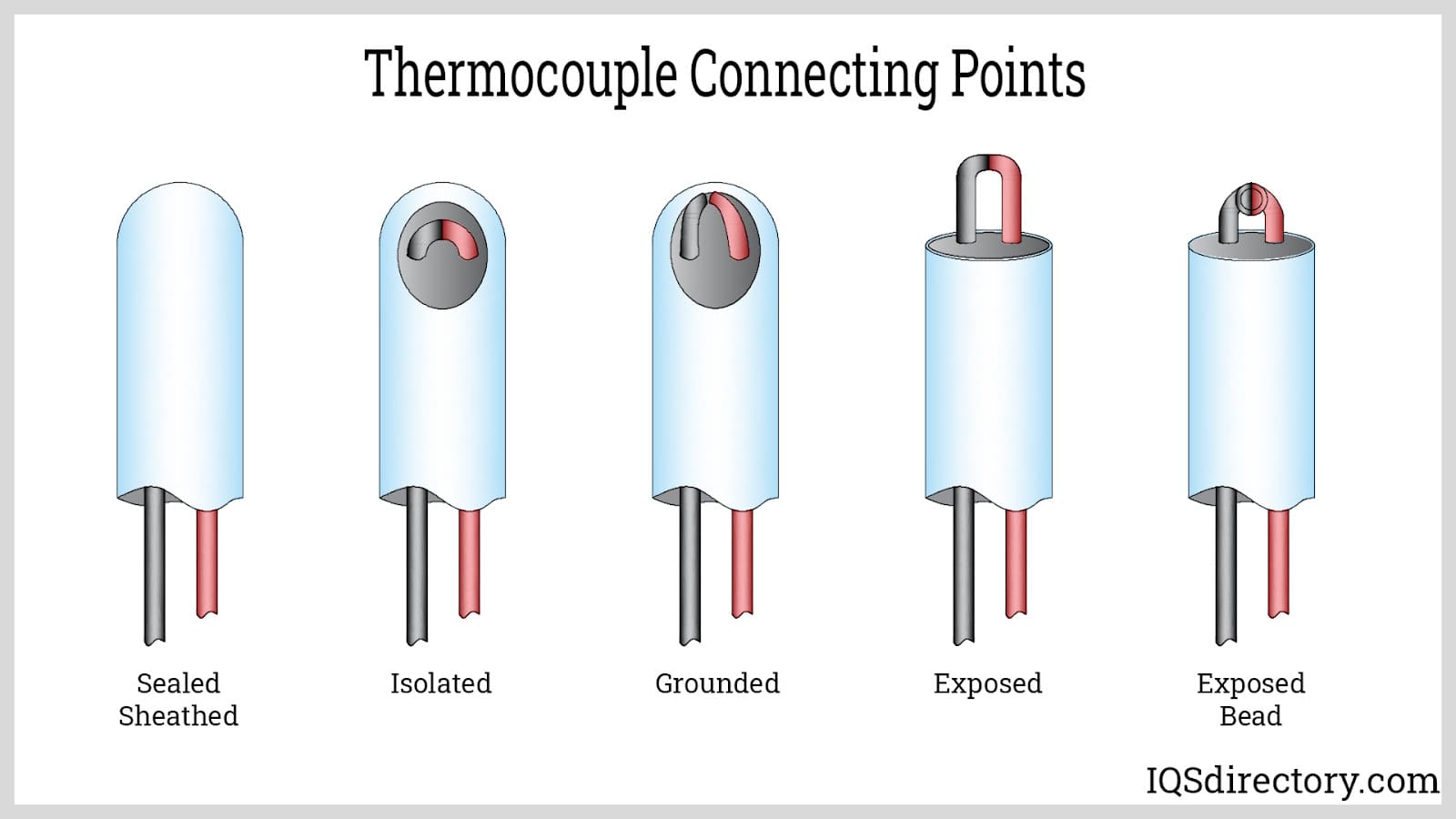
* Висока и добре дефинирана точност;
* Висока чувствителност;
* Малък размер;
* Лесни за употреба;
* Евтини;
* Възможност за извличане на информацията посредством цифрови интерфейси.

**Недостатъци**:

* Неподходящи за извършване на отдалечени измервания в специфични точки;
* Силно ограничен температурен обхват (-55°C до +200°C);
* По-бавни в сравнение с някои от другите видове сензори.

### Термодвойки

Термодвойка се получава, когато проводници от два различни метала се свържат електрически в една точка. В следствие на ефекта на Зеебек се получава напрежение между топлия (точката на свързване на двата проводника) и студения (точката, в която проводникът се свързва към регистриращото устройство) край за всеки от проводниците. Напрежението, получено между студените краища на двата проводника дава информация за температурата на топлия край на термодвойката. В практиката за направа на термодвойки се използват точно определени метали и метални сплави, като всеки вид термодвойка има различни характеристики (температурен обхват, чувствителност, линейност и др.). Всеки вид термодвойка е обособен чрез определена буква – E, J, K, N, T и т.н. Важна особеност на термодвойките е че те се нуждаят от компенсация на студения край (cold-junction-compensation – CJC) – тъй като резултатът от измерването зависи от температурата на студения край, се налага тя да бъде измерена чрез друг температурен сензор. Поради простата им конструкция, термодвойките могат да се изработват във всевъзможни форми и конфигурации според нуждите на измерването, което ги прави изключително универсални. Поради тази причина те са и най-разпространените температурни сензори в днешни дни. На фиг. 2.2.4. са показани няколко възможни конфигурации на термодвойките.



**Фиг. 2.2.4.** Различни варианти за конфигурация на термодвойка

**Предимства** на термодвойките:

* Не се влияят от съпротивлението на проводниците;
* Проста конструкция;
* Сравнително линейни;
* Не се самонагряват;
* Много широк температурен обхват (-260°C до +2300°C);
* Могат да бъдат много бързи.

**Недостатъци**:

* Много ниска чувствителност;
* Нужда от компенсация на студения край;
* Силно податливи на шумове;
* Някои от другите видове температурни сензори са по-точни.

### Сравнение между различните видове сензори

В табл. 2.2.1. е дадено сравнение между четирите основни вида контактни температурни сензори.

Табл. 2.2.1. Сравнение между видовете контактни температурни сензори

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **IC сензор** | **Термистор** | **RTD сензор** | **Термодвойка** |
| Обхват | -55°C  до  +200°C | -100°C  до  +500°C | -240°C  до  +600°C | -260°C  до  +2300°C |
| Точност | Висока | Средна | Висока | Средна |
| Чувствителност | Висока | Висока | Средна | Ниска |
| Линейност | Висока | Ниска | Висока | Средна |
| Цена | Средна | Ниска | Висока | Средна |
| Самонагряване | Не | Да | Да | Не |
| Скорост | Ниска | Средна | Ниска | Висока |

Както се вижда от сравнението, температурните сензори, които достигат най-високи скорости, са термодвойките. Тяхната проста конструкция позволява направата на термодвойки с много малка топлинна маса, които са много бързи – пример за такива са т.нар. коаксиални термодвойки с времеконстанти, достигащи няколко μs[9]. Въпреки предимствата на някои от другите видове сензори, за целите на разработваното устройство от най-голямо значение е скоростта на сензора, .което прави термодвойката най-подходящия, а и на практика единствен кандидат. За щастие, термодвойките нямат недостатъци, които да ги направят негодни за конкретното приложение – проблемите от рода на ниска чувствителност, ниска шумоустойчивост и известна нелинейност могат да бъдат решени чрез схемни и/или програмни методи.

В следващата точка са разгледани няколко съществуващи продукта, които са налични на пазара в днешни дни и имат сходна с търсената функционалност. Дадени са техните характеристики и е направена обосновка защо те са неподходящи и с какво проектираното устройство ще се различава от тях.

## Съществуващи решения

На фиг. 2.3.1. – фиг. 2.3.4. са показани няколко различни устройства с подобно приложение и са дадени техните характеристики, както и причините те да са неподходящи за целите на проекта.



**Фиг. 2.3.1.** 8-канален подръчен логер за 8 вида термодвойки – OMEGA OM-HL-EH-TC

**Основни характеристики** на OMEGA OM-HL-EH-TC[10]:

* 8 канала;
* Поддържа 8 вида термодвойки (K, J, E, T, R, S, N, B);
* Възможност за комуникация с компютър посредством USB;
* Батерийно захранване;
* Идва в комплект със софтуер за обработка и анализ OM-HL;
* Температурен обхват от -200°C до +1370°C;
* Цена: 800 лв.

**Причини уредът да е неподходящ** за целите на проекта:

* Бавно семплиране (1 S/s, т.е. 1 Hz);
* Липса на RF филтрация на входовете.



**Фиг. 2.3.2.** 4-канален USB DAQ – DATAQ DI-245

**Основни характеристики** на DATAQ DI-245[11]:

* 4 диференциални аналогови канала;
* Филтрация за синфазни сигнали на всеки от входовете >100 dB;
* Поддържа 8 вида термодвойки (K, J, E, T, R, S, N, B);
* Извличане на информация посредством USB;
* Идва в комплект със софтуер за обработка и анализ Windaq;
* Честота на семплиране – 2000 Hz при използване на един канал и 200 Hz при използване на два и повече канала;
* Цена: 750 лв.

**Причини уредът да е неподходящ** за целите на проекта:

* Бавно семплиране (дори 2000 Hz не е достатъчна честота на семплиране, а устройството се предвижда да има и повече от един канал, т.е. реалната честота на този уред е 200 Hz);
* Филтрите за синфазни сигнали на входовете са фиксирани и не могат да бъдат настройвани;
* Липсва филтрация за диференциални сигнали – поради голямата амплитуда на RF тока, използван за загряване на кожата, се очаква наличието и на непренебрежим диференциален шум с висока честота, който също трябва да бъде филтриран.



**Фиг. 2.3.3.** 16-канален USB DAQ – PicoLog 1216

**Основни характеристики** на PicoLog 1216 [12]:

* 16 аналогови входа;
* Филтрация на аналогови сигнали с честота над 70 kHz;
* Извличане на информация посредством USB;
* Идва в комплект със софтуер за обработка и анализ PicoScope;
* Честота на семплиране – до 1 MS/s (1 MHz);
* Цена: 650 лв.

**Причини уредът да е неподходящ** за целите на проекта:

* Характеристиките на този уред го правят подходящ за внедряване в разработваното устройство, но той решава само една част от поставените към него задачи;
* Високата цена на практика обезсмисля използването му – поради липсата на някои важни за проектираното устройство модули (филтри, съединители за термодвойки, температурен сензор за компенсация на студения край и т.н.), при всички положения ще се наложи изработката на допълнителна печатна платка, където те са налични, а в такъв случай тя може да се проектира да изпълнява и функциите, които този DAQ предлага, но на по-ниска цена;
* Устройството се предлага с готов софутер за извличане на информация, който може да улесни работата, но може също и да ограничи възможностите за предварителна обработка на данните.



**Фиг. 2.3.4.** Усилвател за коаксиални термодвойки – MVA 10

**Основни характеристики** на MVA 10 [13]:

* Усилване 100 или 1000 пъти;
* Широка честотна лента (1 Hz до 10 MHz);
* Идва със захранващ блок ±15V;
* Производителят предлага като допълнителен продукт нискочестотен филтър с гранична честота 1 MHz, който може да бъде свързан директно към усилвателя;
* Проектиран специално за много бързи коаксиални термодвойки с времеконстанти от няколко μs;
* Цена: Необявена.

**Причини уредът да е неподходящ** за целите на проекта:

* Оптимален вариант, в случай че се използват коаксиалните термодвойки на същия производител, но изключително скъп – една коаксиална термодвойка струва над 2000лв., а цените на усилвателя и филтъра не са обявени, но по всяка вероятност са в същия диапазон;
* Филтърът, който предлага производителя, е със строго фиксирана гранична честота от 1 MHz, което не е подходящо за целите на устройството, тъй като RF шума е със същата честота, т.е. тя трябва да бъде много силно потисната, за да не влияе на измерването.

## Заключение:

От разгледаните в предходната точка уреди става ясно, че многото характерни изисквания към проектираното устройство правят закупуването на готово решение невъзможно, а закупуването на спомагателни модули – непрактично или неизгодно. Ето защо, за целите на дипломния проект ще бъде проектирано напълно специализирано устройство, изпълняващо специфичните изисквания, поставени към него. Като температурен сензор ще бъде използвана термодвойка от някой от широко разпространените видове. Ще бъдат разгледани възможности за софтуерно забързване на измерването на обикновени открити термодвойки, за да се предотврати нуждата от закупуване на много скъпите коаксиални термодвойки. Ще бъдат проектирани схемни и софтуерни решения за филтрация на големия шум, породен от загряващия кожата RF ток.

# Техническо задание

## Цел и предназначение

Устройството трябва да може да се използва за регистриране на много бързи температурни процеси във вътрешността на човешка кожа, предизвикани от радиочестотен ток.

## Принцип на работа

Устройството трябва да предоставя възможност за изчертаване на графика, показваща развитието на температурния процес във времето. Температурният сензор, който ще бъде използван, е термодвойка от стандартен вид. Сигналът от термодвойката трябва да бъде дълбоко филтриран, за да се премахнат шумовете от радиочестотния ток, използван за загряване на кожата. Изходният сигнал от температурния сензор трябва да бъде усилен. Микроконтролер трябва да регистрира и изпрати усиления сигнал към компютър посредством USB интерфейс. Данните трябва да бъдат приети и обработени от компютърно приложение, което да визуализира резултата от измерването. Компютърното приложение трябва да предоставя на потребителя широк контрол над измервателния процес и по-нататъшната обработка на данните.

## Параметри (характеристики)

Изисквания към устройството:

* Брой канали: 4
* Температурни сензори: термодвойки от тип J, K, T или E;
* Обхват: -20°C до 230°C
* Чувствителност: 0.1°C;
* Точност: ≤10% грешка за целия обхват [TBD];
* Честота на семплиране: до 100 kS/s (100 kHz), т.е. период на семплиране 10 μs;
* Връзка към компютър: посредством USB интерфейс;
* Управление: чрез компютърно приложение;
* Възможност за вторична обработка на измерванията с цел изкуствено забързване на температурния сензор и допълнителна филтрация;
* Филтрация на случайни синфазни и диференциални шумове за всеки от каналите;
* Възможност за включване на специална дълбока филтрация към всеки от каналите, предназначена за потискане на синфазен и диференциален шум с честота 1 MHz, породен от загряващия RF ток.
* Възможност за визуализация на снетите данни и записването им във файл.

# Блокова схема

# Принципна електрическа схема

# Алгоритъм на работа

# Резултати

# Заключение

# Използвана литература

[1] [Types of Temperature Sensors: A Comprehensive Guide – KEYENCE](https://www.keyence.com/products/daq/data-loggers/resources/data-logger-resources/types-of-temperature-sensors.jsp)

[2] [The Basic Science of Radiofrequency-Based Devices – Michael Kreindel and Stephen Mulholland](https://inmodemd.com/wp-content/uploads/2021/03/PeerRev_IntechChapter_RFScience_MKSM.pdf)

[3] [Comparing Contact and Non-Contact Temperature Sensors – Process Parameters](https://www.processparameters.co.uk/comparing-contact-and-non-contact-temperature-sensors/)

[4] [Comparing Contact and Non-Contact Temperature Sensors – AZo Sensors](https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=2347)

[5] [Fiber-Optic Temperature Measurement – OMEGA](https://www.omega.co.uk/technical-learning/fiber-optic-temperature-measurement.html)

[6] [Temperature sensing fundamentals – Texas Instruments](https://www.ti.com/lit/ab/snoaa25/snoaa25.pdf?ts=1712045639566&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

[7] [Temperature Sensor Comparison Guide – WATLOW](https://www.watlow.com/resources-and-support/engineering-tools/knowledge-base/temperature-sensors-comparison-guide)

[8] [Types of Temperature Sensors - DigiKey](https://www.digikey.com/en/blog/types-of-temperature-sensors)

[9] [Thin Film Gauges and Coaxial Thermocouples for Measuring Transient Temperatures - Müller Instruments](https://mueller-instruments.de/fileadmin/Downloads/englische_medien/Description-gauges.pdf)

[10] [OMEGA OM-HL-EH-TC](https://www.omega.co.uk/pptst/OM-HL-EH-TC.html)

[11] [DATAQ DI-245](https://www.dataq.com/products/di-245/#specifications)

[12] [Pico Technology PicoLog 1216](https://www.picotech.com/data-logger/picolog-1000-series/multi-channel-daq)

[13] [Müller Voltage Amplifier MVA 10](https://mueller-instruments.de/en/verstaerker/spannungs-verstaerker-mva-10)

[14]

[15]

[16]

[17]

[18]

[19]

[20]