



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MĚŘENÍ PROCESNÍ VELIČINY – TEPLOTA

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLE – TEMPERATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MATĚJ DVOŘÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. ANTONÍN KONEČNÝ

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Bc. Matěj Dvořák**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Antonín Konečný**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření procesní veličiny – teplota

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Teplota má významný vliv u mnoha procesů. Proto patří často mezi základní procesní veličiny, které se monitorují. V současné době je žádoucí, aby se jednotlivé procesní veličiny měřily, vyhodnocovaly v reálném čase. Způsob a rychlost měření, zpracování, vyhodnocení těchto veličin má zásadní vliv na dodržení technologických postupů nebo norem. Proto je nezbytné věnovat této problematice náležitou pozornost.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti měření teploty.
Začlenění měření teploty do měřicího řetězce.
Popsat a uvést příklady vlivů na nejistotu měření teploty.
Využití bezdrátové komunikace.
Vlastní závěry a/nebo doporučení.

Seznam doporučené literatury:

NETOLICKÝ, P., KUPKA, L. a TŮMOVÁ, O., 2020. Analysis of a measurement process in the field of variability. In: Proceedings of the 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics): CDEE 2020. Plzeň, 2020, s. 172-175. ISBN 978-1-72815-879-2.

Sborníky technické harmonizace: Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

FRADEN, J. Handbook of Modern Sensors. 5th ed. 2016. Cham: Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-19302-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-19303-8.

NOVÁK, M. Technická měření. V Praze: České vysoké učení technické, 2018, 234 s. ISBN 978-80-01-06388-0.

KREIDL, M. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-7300-145-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce shrnuje dnešní poznatky o snímačích a senzorech používaných pro měření teploty, kterých existuje velké množství. Proto by měla sloužit jako průvodce světem měření teploty od úplných základů podstaty měření, přes vysvětlení pojmů a rozboru charakteristik přístrojů pro měření až po podrobný výčet jejich druhů. Dále je zde možné se zorientovat v množství vydaných dokumentů a norem a získat přehled o prostředcích pro bezdrátovou komunikaci. Jelikož je tato problematika velmi obsáhlá, je tato publikace určena jako pomocník pro běžné použití nebo jako rozcestník pro nasměrování k zjištění podrobnějších informací v zájmové oblasti.

Summary

This thesis summarizes the current knowledge about temperature sensors used for measurement, of which there is a wide variety. Therefore, it should serve as a guide to the world of temperature measurement, starting from the fundamental principles of measurement, explaining terms and analysing the characteristics of measuring instruments, and providing a detailed overview of their types. Additionally, it allows readers to navigate through the abundance of published documents and standards and provides an overview of wireless communication methods. As this topic is extensive, this publication is intended to be a practical tool for everyday use or a reference point for finding more detailed information in the specific area of interest.

Klíčová slova

snímače, senzory, měření teploty, typy snímačů, normy, bezdrátová komunikace

Keywords

data acquisition system, sensors, temperature measurement, sensor types, standards, wireless communication



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁK, Matěj. Měření procesní veličiny – teplota. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149654>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Antonín Konečný.

Děkuji mé milované rodině za jejich neustálou podporu, kterou mi poskytli během mého studia a při psaní této bakalářské práce. Vaše láska, trpělivost a povzbuzení byly neocenitelné. Bez Vaší podpory bych nedokázal překonat všechny výzvy, které mi studium přineslo.

Děkuji také mému vedoucímu práce, za jeho cenné rady, vedení a podporu během psaní této bakalářské práce. Jeho odborné vědomosti v dané problematice byly velkým přínosem.

Bc. Matěj Dvořák

Prohlašuji, že tato bakalářská práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků.

V Brně dne 21. 5. 2023

Bc. Matěj Dvořák

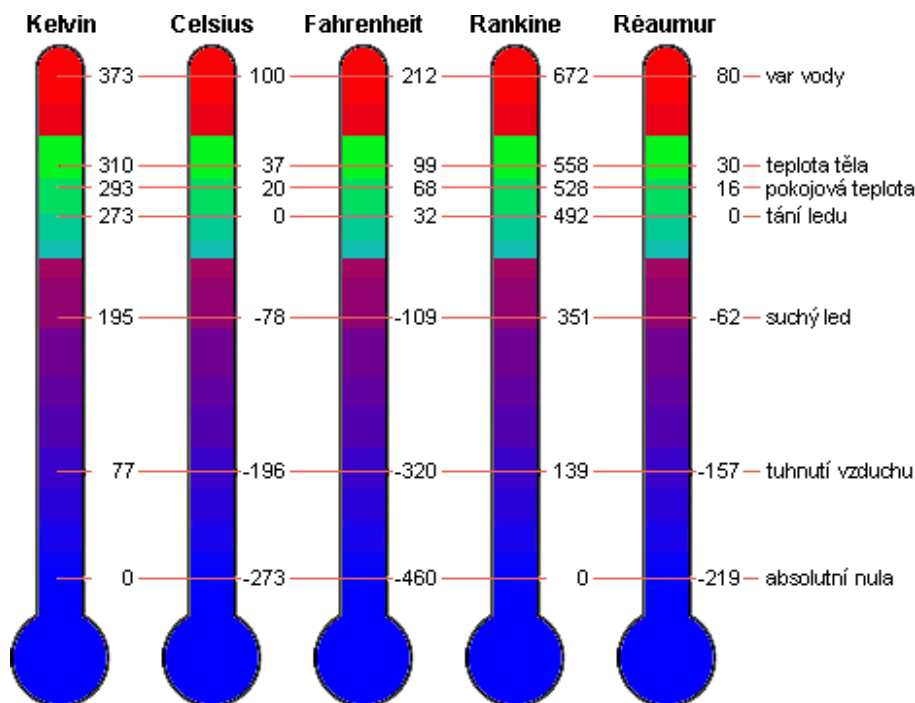
Obsah

1	Úvod	15
2	Pojmy a klasifikace přístrojů	17
2.1	Ujasnění pojmů	17
2.2	Teoretický úvod	17
3	Rozdělení senzorů teploty	26
3.1	Kontaktní senzory	27
3.1.1	Odporové senzory	27
3.1.2	Termočlánky	30
3.1.3	Dilatační senzory	31
3.1.4	Termochromické senzory	32
3.2	Bezkontaktní snímače teploty	33
3.2.1	Termokamery a pyrometry	34
3.2.2	Speciální snímače a senzory	36
4	Přenos dat	39
4.1	Přenos optickými a metalickými kabely[35]	39
4.1.1	Druhy používaných kabelů	39
4.1.2	Protokoly pro přenos dat	40
4.2	Bezdrátový přenos	43
4.3	Srovnání	47
5	Nejistoty měření	49
6	Dokumenty související s měřením teploty	52
7	Vlastní závěr	55
8	Závěr	56
9	Seznam použitých zkratk	57

1 Úvod

Již dávno v historii si lidé všímali tepla a snažili se nějakým způsobem změřit jeho intenzitu, čímž se dostali k měření teploty. Teplota je základní fyzikální veličina, která popisuje tepelný stav hmoty. V širším fyzikálním pojetí lze říci, že vyjadřuje rychlost pohybu molekul, v technických oborech bývá jednou z nejdůležitějších a nejčastěji pozorovaných vlastností. Nejjednodušším způsobem jak teplotu změřit zůstává využitím teplotní expanze. To využívají teploměry s kapalinou uzavřenou ve skleněné nádobě, které jsou dobře známé, ale v technické praxi a procesním měření velké využití nemají. Pro takové prostředí je potřeba nějakým způsobem získávat data pro další zpracování a proto se využívají typy teploměrů reagující na změnu odporu, termoelektrické, polovodičové, optické, akustické, piezoelektrické a jiné, kterými se právě tato práce zabývá. [15]

Teplotní senzory můžou být pomyslně rozděleny například podle typu měření na absolutní a relativní. Relativní teplotní senzory měří rozdíl teplot mezi dvěma zvolenými objekty nebo povrchy. Data z měření můžou být dále zpracovány a využitím znalosti o teplotě jednoho z bodů převedeny na hodnoty absolutní. Absolutní udávají hodnotu teploty vzhledem k nějaké referenční nulové teplotě. Podle této referenční nulové teploty se dle [22] a [15] používá několik stupnic, pro technické měření v České republice postačují stupnice dvě a to termodynamická a Celsiova. Termodynamická stupnice má za počátek absolutní nulu a jednotkou je Kelvin K , jenž je základní jednotkou soustavy SI. Rozdíl jednoho stupně v termodynamické stupnici a Celsiově je stejný a stupeň Celsia vznikl historicky jako jedna setina rozpětí mezi bodem tuhnutí a bodem varu vody. Srovnání těchto dvou hlavních stupnic ale i přehled dalších možných je na následujícím obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Srovnání stupnic pro měření teploty [4]

Procesní měření teploty hraje klíčovou roli v průmyslové praxi, a to nejen v oblastech jako chemický průmysl, energetika nebo potravinářství, ale také v mnoha dalších odvětvích. Správné a přesné měření teploty je zásadní pro monitorování a řízení procesů, bezpečnost zařízení a kvalitu výrobků.

Tento text se zabývá důležitými aspekty procesního měření teploty. Na začátku je seznámení s klíčovými pojmy, které jsou nezbytné pro porozumění tomuto tématu. Následně je podrobněji rozebrán měřicí řetězec, který je tvořen různými komponenty, jako jsou snímače, převodníky, výpočetní jednotky a zobrazovací zařízení. Porozumění a správné pochopení měřicího řetězce je klíčové pro zajištění přesných a spolehlivých výsledků měření teploty. Dále jsou zmíněny charakteristiky a vlastnosti snímačů teploty, které jsou nedílnou součástí měřicích systémů.

Další kapitola se zaměří na výčet různých druhů snímačů teploty, které jsou k dispozici v průmyslové praxi. Vysvětluje různé technologie, jako jsou termočlánky, odporové teploměry, termistory a infračervené senzory, a analyzuje jejich výhody, nevýhody a oblasti použití.

Následuje představení posledního trendu v procesním měření teploty - bezdrátovou komunikaci. Zavedení bezdrátových technologií nabízí nové možnosti a výhody, jako je snadná instalace, flexibilita a snížení nákladů. V této části se také hodnotí různé bezdrátové komunikační protokoly a jejich využití v průmyslové praxi.

Pátá kapitola je zaměřena na vyjadřování nejistot měření. Je zde popsán způsob dělení a jsou uvedeny základní rovnice pro výpočty.

V neposlední řadě je důležitý aspekt procesního měření teploty - soupis norem, nařízení a standardů. Normy a standardy mají klíčový význam pro harmonizaci a zajištění spolehlivosti měření teploty.

Celý text se zaměřuje na poskytnutí uceleného přehledu o procesním měření teploty v průmyslové praxi. Cílem je poskytnout čtenářům nezbytné znalosti, které jim umožní lépe porozumět, vybrat a implementovat vhodné měřicí systémy a technologie pro jejich specifické potřeby v oblasti měření teploty.

2 Pojmy a klasifikace přístrojů

2.1 Ujasnění pojmů

Pro pojmenování přístrojů na měření teploty se v českém jazyce používá několik pojmů. V publikacích je možno se setkat se senzorem, snímačem, převodníkem, detektorem nebo čidlem. Slovník současné češtiny na webu Nechybujte.cz[24] uvádí tyto definice:

- **čidlo** – snímací zařízení schopné něco regulovat
- **detektor** – zařízení zjišťující přítomnost nějakého (fyzikálního) jevu
- **senzor** – zařízení, které přeměňuje veličinu na elektrický signál, čidlo
- **snímač** – technické zařízení převádějící (světlo, zvuk ap.) na elektrický signál

V odborné literatuře pak někteří autoři uvádějí, že tyto pojmy jsou ekvivalentní[12], jiní rozlišují mezi pojmy převodník a senzor, přičemž senzor a snímač nechávají na stejné úrovni[22], já v této publikaci používám pojem senzor ve smyslu dříve známého převodníku, tedy jako „*technické zařízení, které převádí měřenou fyzikální veličinu na výstupní signál*“[22]. Senzor je tedy v mnoha případech jen první článek v měřicím řetězci a jeho signál musí být dále zpracován. V některých situacích jako jsou již hotové komerční přístroje nebo pokud nelze jasně rozlišit, kde končí která část měřicího řetězce, popřípadě kde by nebylo objektivně možné oddělit sensorovou část a část na zpracování je použit pojem snímač. Pojem snímač je také použit pokud se mluví o celém zařízení v rámci měřicího řetězce. Takovéto pojmenování lépe koresponduje se zahraniční literaturou kde pojem senzor vyjadřuje „*sensor*“ a pojem snímač vyjadřuje „*data acquisition system*“. V následující části zabývající se problematikou měřicího řetězce (obr. 2.2) je toto názorně ukázáno.

2.2 Teoretický úvod

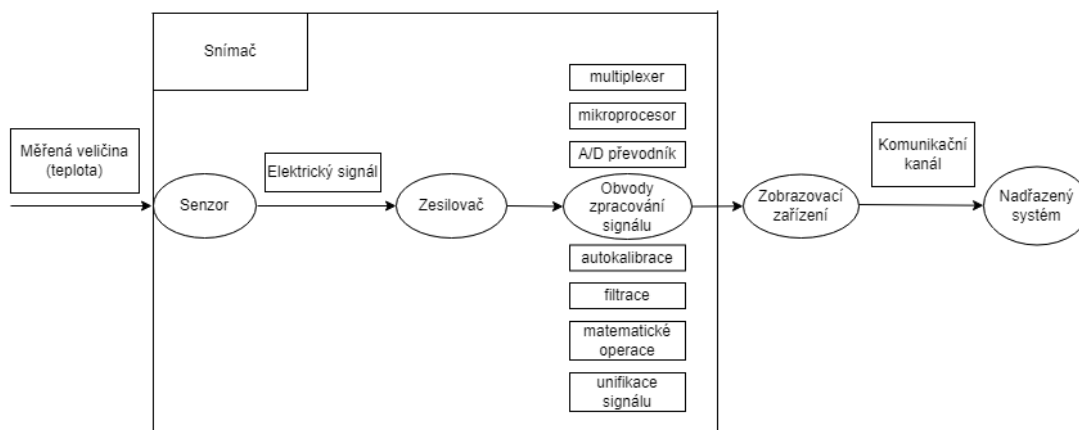
Od 20. května 2019 je dle zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii [32], § 2 odst. 3, písm e) kelvin definován „stanovením pevné číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k , která je rovna $1,380649 \times 10^{-23}$, je-li vyjádřena v jednotkách $J \cdot K^{-1}$, která je rovna $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány prostřednictvím h , c a $\Delta\nu_{Cs}$ “. V praxi se nejčastěji používá označení $T [K]$ a $t [^{\circ}C]$ pro termodynamickou stupnici a stupnici Celsiovu respektive.

Tato část je zaměřena na teoretický úvod do problematiky měřicího řetězce (obr. 2.2) a zesílení signálu (obr 2.2) v teplotních senzorech. Měřicí řetězec představuje soubor bloků, které umožňují převod měřené fyzikální veličiny, v našem případě teploty, na elektrický signál a jeho zpracování. Tento proces zahrnuje měření senzorem, zesílení signálu, modulaci, filtraci a převod z analogového na číslicový signál. Výsledný signál je poté zobrazen nebo může být dále zpracován pomocí mikroprocesorové techniky. Zesílení signálu z teplotního senzoru je nezbytné kvůli slabosti a náchylnosti výstupního signálu. Tyto zesilovače umožňují zvýšení přesnosti a spolehlivosti měření teploty. V této části je také seznámení se všeobecnými charakteristikami teplotních senzorů (viz 2.2), včetně citlivosti, prahové citlivosti, dynamického rozsahu, reprodukovatelnosti, rozlišitelnosti, linearity, času odezvy, šířky frekvenčního pásma a parametrů šumu.

Měřicí řetězec

Měřicí řetězec sestává z několika po sobě jdoucích bloků. První v řadě je měřená veličina, v tomto případě teplota, zaznamenaná senzorem, který ji převede na elektrický signál. Tento signál je ve většině případů nutné zesílit zesilovačem a až poté zpracovat. Zpracování může znamenat modulaci, frekvenční omezení, filtraci nebo převod z analogového signálu na číslicový. Další operace tak můžou probíhat díky mikroprocesorové technice nebo analogovou cestou. Posledním členem pak bývá nějaké zobrazovací zařízení, které slouží k zobrazení naměřené teploty. Může se jednat o jednoduchý teploměr, ale často se používají digitální zobrazovače, které umožňují snadné čtení a ukládání naměřených hodnot. Pokročilejší zobrazovací zařízení mohou umožňovat i další funkce, jako například výpočet průměrné teploty nebo ukládání dat do paměti pro další analýzu. Výstupní analogový signál je buď přímo spjatý s ukazatelem nebo zapisovačem anebo může být dále upraven pro přenos dat blokem unifikace signálu. Unifikace analogových signálů se standardně provádí na hodnoty 0 V až 10 V nebo 0 mA až 20 mA nebo pro možnou signalizaci chyby v rozsahu 4 mA až 20 mA . [12]

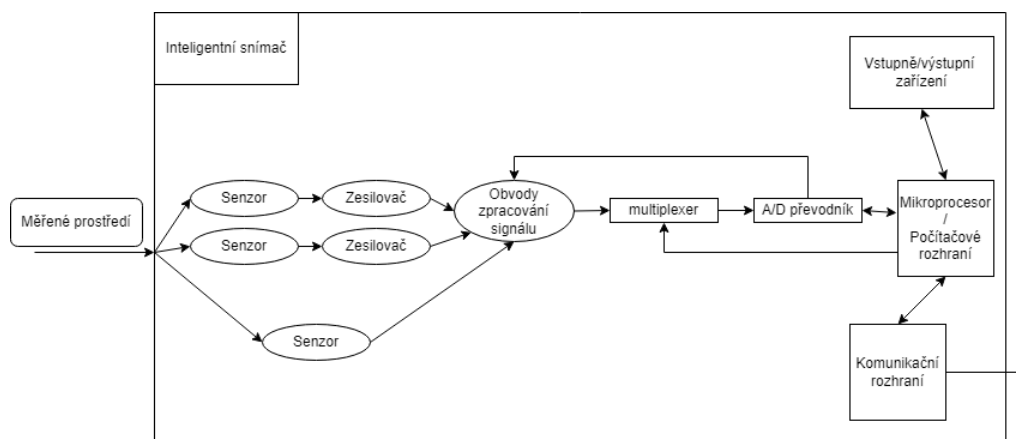
Při číslicovém zpracování je nejprve analogový signál převeden analogově číslicovým převodníkem a poté dále zpracován. Digitální zpracování má své výhody v podobě zpracování mikroprocesorovou technikou, která umožňuje provádět jakékoliv matematické operace, ukládání dat pro další zpracování nebo posílání těchto dat přes datovou komunikaci. Schéma měřicího řetězce je vidět na obrázku níže 2.1, kde je také patrné rozdělení pojmů sensor a snímač.



Obrázek 2.1: Schéma měřicího řetězce

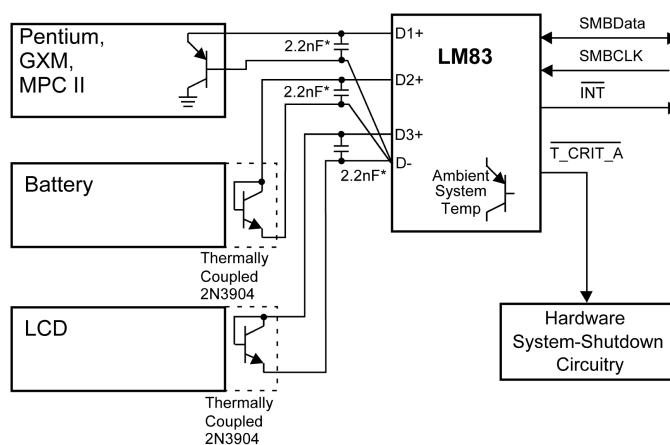
Celý měřicí řetězec může být napájen buď z baterií, nebo z elektrické sítě. Důležitou součástí měřicího řetězce je také ochranný obal senzoru, který slouží k ochraně senzoru před poškozením v důsledku vlivů prostředí (např. vibrace, prach, vlhkost).

Dalším vývojovým stupněm je tzv. inteligentní snímač. „Inteligentní senzor je senzor, který zahrnuje v jednom kompaktním provedení jak senzor tak i obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu.“ [12] Pojmenování senzor vychází z původního anglického názvu „smart sensor“, ale vzhledem k obsahu a funkci by více odpovídalo pojmenování inteligentní snímač. Modernější anglická literatura přešla na pojmenování „data acquisition system“ a proto i v této publikaci je použit pojem inteligentní snímač. Různé firmy na trhu si pro svoje účely můžou definovat vlastní strukturu takového inteligentního snímače, ale pro přehled je uvedeno následující schéma 2.2, které na první pohled dobře vysvětluje co se v takovém uzavřeném funkčním celku může nacházet.



Obrázek 2.2: Obecné schéma možné struktury inteligentního snímače

Inteligentní snímače jsou schopny nejenom získávat a vysílat data, ale také je předzpracovávat a analyzovat. Tyto snímače jsou vybaveny procesorem, pamětí a komunikačním rozhraním, díky čemuž jsou schopny zpracovat data ještě před tím, než je odešlou na sběrnici nebo do cloudového úložiště. Mohou také být vybaveny různými typy algoritmů, například pro detekci anomálií v datech, rozpoznávání vzorců nebo predikci budoucích hodnot. Díky tomu mohou poskytovat výkonnější a sofistikovanější funkce než klasické snímače. Inteligentní snímače se často používají v průmyslové automatizaci, IoT (*Internet of Things*) a v dalších aplikacích, kde je požadována vysoká přesnost a rychlost sběru a zpracování dat. Blokové schéma skutečného snímače je vidět na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Blokové schéma vnitřku obvodu LM83 [28]

Zesílení signálu

Zesilovače signálu z teplotního senzoru se používají k zesílení velmi malých signálů, které jsou generovány senzorem na základě změny teploty. Tyto signály jsou velmi slabé a náchylné na rušení, proto je nutné je zesílit a zpracovat.[21]

Existuje několik typů zesilovačů signálu z teplotního senzoru, z nichž každý má své vlastnosti a použití. Při prostudování trhu lze zjistit, že nejběžnější jsou:

- **Zesilovače s nízkým šumem** – Tyto zesilovače se používají pro měření teplot v aplikacích, které vyžadují velmi přesné a stabilní výstupy. Mají nízký šumový výkon, což znamená, že mohou snímat velmi malé signály s vysokou přesností a bez rušení.
- **Zesilovače s vysokým ziskem** – Tyto zesilovače mají velký zisk a mohou zesílit signál až několik tisíckrát. Používají se pro zesílení velmi malých signálů z termočlánků nebo jiných senzorů, které mají malý výstupní signál.
- **Zesilovače s nízkým vstupním odporem** – Tyto zesilovače mají nízký vstupní odpor, což umožňuje připojení senzoru s nízkým výstupním signálem přímo k zesilovači. Tento typ zesilovače se používá pro snímání teploty v aplikacích s velmi dlouhým vedením.
- **Diferenciální zesilovače** – Tyto zesilovače mají dva vstupy a výstup. Jsou ideální pro měření rozdílu teplot mezi dvěma místy.
- **Zesilovače s izolačním transformátorem** – Tyto zesilovače jsou navrženy tak, aby oddělily vstupní signál od výstupního signálu pomocí izolačního transformátoru. Jsou vhodné pro aplikace, kde je nutné oddělit měřicí signál od výkonového obvodu.
- **Digitální zesilovače** – Tyto zesilovače digitalizují vstupní signál teploty a výstupní data jsou poskytována v digitální formě. Jsou vhodné pro aplikace, kde je nutné přenášet data na větší vzdálenosti a/nebo zpracovávat data v digitální formě.

Zesilovače signálu z teplotního senzoru mohou mít různé formy, od jednoduchých obvodů s několika součástkami po složitě mikroprocesorové řízení s digitálními výstupy. V závislosti na aplikaci mohou být použity různé typy zesilovačů, aby se dosáhlo nejlepšího výkonu a přesnosti.

Všeobecné charakteristiky

Mezi typické parametry a všeobecné charakteristiky lze podle [12] zahrnout následující:

- Citlivost
- Práh citlivosti
- Dynamický rozsah
- Reprodukovatelnost
- Rozlišitelnost
- Linearita
- Parametr časové odezvy
- Časová konstanta dotykových senzorů
- Základní parametry senzorů záření
- Šíře frekvenčního pásma
- Frekvenční rozsah
- Rychlost číslicového přenosu
- Parametry šumu

Citlivost

Citlivost je fyzikální veličina, která vyjadřuje, jakým způsobem se měřená veličina mění v závislosti na změně vstupního signálu. V případě teplotních senzorů se citlivost obvykle udává jako změna výstupního signálu (například změna odporu u termistoru nebo změna výstupního napětí u termočlátku) na jednotkovou změnu teploty.

Typicky se citlivost uvádí jako číslo s jednotkou výstupního signálu na jednotkovou změnu měřené veličiny, například „10 mV/°C“ pro termočlátku nebo „0,1 Ω/°C“ pro termistory. Vyšší citlivost znamená, že senzor bude schopen detekovat menší změny teploty s větší přesností.

Podle [12] je citlivost K definována takto:

$$K = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (2.1)$$

Práh citlivosti

Práh citlivosti teplotního senzoru znamená nejnižší hodnotu změny teploty, kterou senzor dokáže detekovat a přesně změřit. Pokud teplotní změna senzorem není dostatečně velká, senzor nedokáže poskytnout spolehlivá data. Práh citlivosti tedy určuje, jak malá teplotní změna musí nastat, aby senzor reagoval a změřil ji. Práh citlivosti se obvykle udává v jednotkách teploty, jako například miliKelvinech nebo setinách stupně Celsia.

Také lze podle [12] definovat práh citlivosti jako hodnotu, při níž je roven výstupní signál senzoru a střední kvadratická odchylka šumu. Tedy:

$$u_\gamma = \sqrt{u_s^2} \quad (2.2)$$

Dynamický rozsah

Dynamický rozsah je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou, které může senzor přesně měřit. Jinými slovy, jedná se o rozsah mezi nejvyšší a nejnižší teplotou, při které může senzor poskytnout přesné a spolehlivé měření. Pokud se měřená teplota nachází mimo tento rozsah, výstup senzoru bude nejspíše nesprávný nebo nepřesný. Dynamický rozsah je tedy důležitým parametrem při výběru senzoru pro konkrétní aplikaci, aby byla zajištěna přesnost a spolehlivost měření v celém rozsahu teplot, které mohou být měřeny.

Reprodukovatelnost

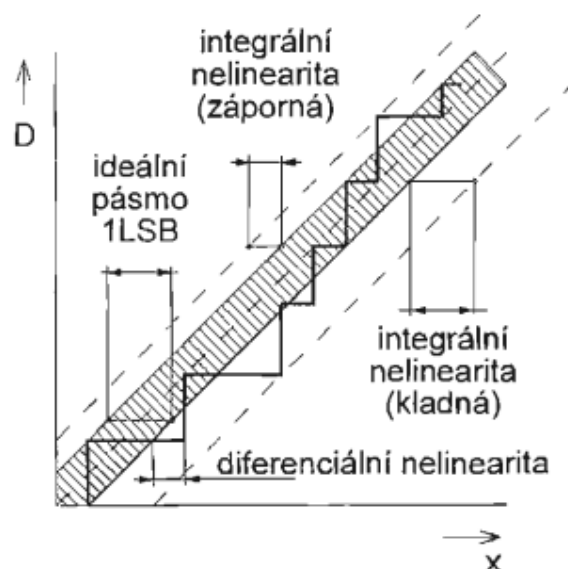
Reprodukovatelnost se v kontextu teplotních senzorů vztahuje na schopnost opakovaně měřit stejnou hodnotu teploty za stejných podmínek. Jinými slovy, pokud je senzor schopen reprodukovat stejnou výstupní hodnotu teploty při opakovaných měřeních za stejných podmínek, říkáme, že je reprodukovatelný. Reprodukovatelnost senzoru je důležitá pro zajištění přesnosti měření a pro získání konzistentních výsledků v průběhu dlouhodobého používání senzoru.

Rozlišitelnost

Rozlišitelnost (nebo také rozlišovací schopnost) v kontextu teplotních senzorů znamená nejmenší změnu teploty, kterou senzor dokáže rozlišit a zaznamenat jako změnu signálu. Tato hodnota je obvykle vyjádřena v jednotkách teploty (např. °C nebo K) a je dána vztahem mezi citlivostí senzoru a jeho šumem. Vyšší rozlišitelnost znamená, že senzor dokáže rozlišit menší změny teploty, což může být důležité například pro aplikace s velmi malými rozdíly teplot nebo pro aplikace s vysokou přesností měření.

Linearita

Linearita u teplotních senzorů znamená schopnost senzoru vracet výstupní signál, který je přímo úměrný měřené teplotě. Ideální senzor by měl mít lineární odezvu, což znamená, že každá změna v měřené teplotě bude mít stejnou úroveň změny v hodnotě výstupního signálu. Pokud je senzor lineární, umožňuje to snadnější kalibraci a měření s větší přesností. Sensory s nelineární odezvou musí být kalibrovány pro každou měřenou teplotu zvlášť, což může být časově náročné. Příkladem chyby nelinearity je patrný z obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Nelinearita při číslicovém zpracování signálu [12]

Parametr časové odezvy

Parametr časové odezvy se týká doby, kterou senzor potřebuje k reakci na změnu teploty. Vyjadřuje, jak rychle senzor dokáže detekovat změny teploty a jak rychle dokáže poskytnout přesné měření. Obvykle se vyjadřuje v sekundách a závisí na různých faktorech, jako je například tepelná kapacita senzoru, rychlost toku tepla a tepelná vodivost materiálu senzoru. Čím menší je časová odezva senzoru, tím rychleji dokáže detekovat změny teploty a poskytnout přesné měření.

Časová konstanta dotykových senzorů

Tato část byla převzata z knihy *Senzory a měřící obvody*[12].

Za předpokladu nekonečně velké tepelné vodivosti λ senzoru teploty a přenosu tepla pouze konvekcí bude pro teplo dQ_1 přivedené do senzoru a teplo v senzoru akumulované dQ_2 platit tepelná bilance $dQ_1 = dQ_2$, neboli platí:

$$S \cdot \alpha \cdot (\vartheta_m - \vartheta_t) \cdot dt = m \cdot c \cdot d\vartheta_t \quad (2.3)$$

Kde:

- S je plocha povrchu senzoru,
- α součinitel přestupu tepla,
- ϑ_m teplota měřeného prostředí,
- ϑ_t teplota senzoru,
- t čas,
- m hmotnost senzoru,
- c měrná tepelná kapacita senzoru.

Řešením rovnice 2.3 pro skokovou změnu z teploty ϑ_0 na teplotu ϑ_m dostaneme

$$\vartheta_t - \vartheta_0 = (\vartheta_m - \vartheta_0) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.4)$$

kde τ je časová konstanta senzoru, daná rovnicí

$$\tau = \frac{m \cdot c}{S \cdot \alpha} \quad (2.5)$$

U reálného senzoru není $\lambda = \infty$ a přechodová charakteristika nebude prvního řádu. Pokud lze přechodovou charakteristiku aproximovat přenosovou funkcí prvního řádu, lze místo α dosadit do vztahu 2.5 součinitel prostupu tepla k [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Základní parametry senzorů záření

Tato část byla převzata z knihy *Senzory a měřicí obvody* [12].

1. Integrální citlivost K je dána podílem elektrického signálu U na výstupu senzoru a zářivého toku Φ dopadajícího na citlivou plochu senzoru, tj.

$$K = \frac{U}{\Phi} [V \cdot W^{-1}] \quad (2.6)$$

2. Spektrální citlivost K_λ udává závislost citlivosti K na vlnové délce λ , neboli

$$K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda} \quad (2.7)$$

3. Relativní spektrální citlivost S_λ je dána vztahem

$$S_\lambda = \frac{K}{K_{\lambda max}} \quad (2.8)$$

4. NEP¹ udává zářivý tok, při kterém je hodnota výstupního signálu U právě rovna efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí:

$$NEP = \Phi \frac{\sqrt{u_s^2}}{U} [W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}] \quad (2.9)$$

Kde:

- $\sqrt{u_s^2} = \sqrt{\frac{U_s^2}{\Delta f}}$ je spektrální hustota šumového napětí,
 - $\sqrt{U_s^2}$ efektivní hodnota integrálního šumového napětí.
5. Detektivita D (detekční schopnost, měrná detektivita) je definována jako převrácená hodnota NEPu, tj. $D = 1/NEP$. V praxi se tato jednotka obvykle vztahuje k odmocnině citlivosti plochy senzoru záření a značí se D^* , neboli

$$D^* = \frac{\sqrt{S}}{NEP} \quad (2.10)$$

Šíře frekvenčního pásma

Šíře frekvenčního pásma (anglicky *bandwidth*) udává rozsah frekvencí signálu, které mohou být přenášeny bez ztráty kvality. U teplotních senzorů a měřicích přístrojů se obvykle udává jako rozsah frekvencí, ve kterém senzor a přístroj poskytují spolehlivou a přesnou odezvu. Tento parametr je důležitý zejména pro měření rychle se měnících teplot nebo pro použití senzorů v průmyslových procesech, kde je nutné získat rychlé a spolehlivé měření. V praxi se šíře frekvenčního pásma může ovlivnit různými faktory, jako jsou kvalita zesilovače, vlastnosti kabeláže, elektromagnetické rušení atd.

¹NEP – *Noise Equivalent Power* – výkonový ekvivalent

Frekvenční rozsah

Frekvenční rozsah označuje rozsah frekvencí, které mohou být přesně naměřeny nebo přeneseny prostřednictvím daného zařízení nebo systému. U teplotních senzorů, například, může být frekvenční rozsah omezen reakční dobou senzoru a elektronickými obvody, které signál zpracovávají a přenášejí. Pro většinu teplotních senzorů se frekvenční rozsah pohybuje od několika Hz až po několik kHz. Je důležité zajistit, aby frekvenční rozsah byl dostatečně široký pro požadované aplikace, jako například měření rychle se měnících teplot v průběhu výrobních procesů.

Rychlost číslicového přenosu

Rychlost číslicového přenosu (anglicky *data rate*) je množství digitálních dat, které mohou být přeneseny za jednotku času, vyjádřené v bitech za sekundu (bps nebo b/s). Je to základní parametr digitálních komunikačních systémů a měří rychlost přenosu dat mezi dvěma body v digitální formě. Rychlost číslicového přenosu závisí na rychlosti toku signálu, na počtu bitů, které jsou přenášeny a na použitém kódování signálu.

Parametry šumu

Parametry šumu popisují množství šumu, který je generován v měřicím systému. Následující parametry jsou nejčastěji používané:

RMS² šum: Hodnota, která vyjadřuje střední kvadratickou hodnotu šumu. Jedná se o kvadratickou střední hodnotu rozdílu mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou.

Šumové spektrum: Popisuje rozložení šumu v závislosti na frekvenci. Čím vyšší je šumové spektrum v určité frekvenční oblasti, tím větší je šum v této oblasti.

THD³: Udává poměr zkresleného signálu k celkovému signálu. Vyjadřuje se v procentech a zahrnuje zkreslení všech harmonických frekvencí v měřeném signálu.

SNR⁴: Poměr výkonu signálu k výkonu šumu v měřicím systému. Vyšší hodnota SNR znamená lepší kvalitu signálu.

ENOB⁵: Počet bitů, které mohou být použity pro reprezentaci signálu při dané úrovni šumu. Vysoká hodnota ENOB znamená, že můžeme měřit s větší přesností a vyšším rozlišením.

²RMS – *root mean square noise* – střední kvadratická hodnota šumu

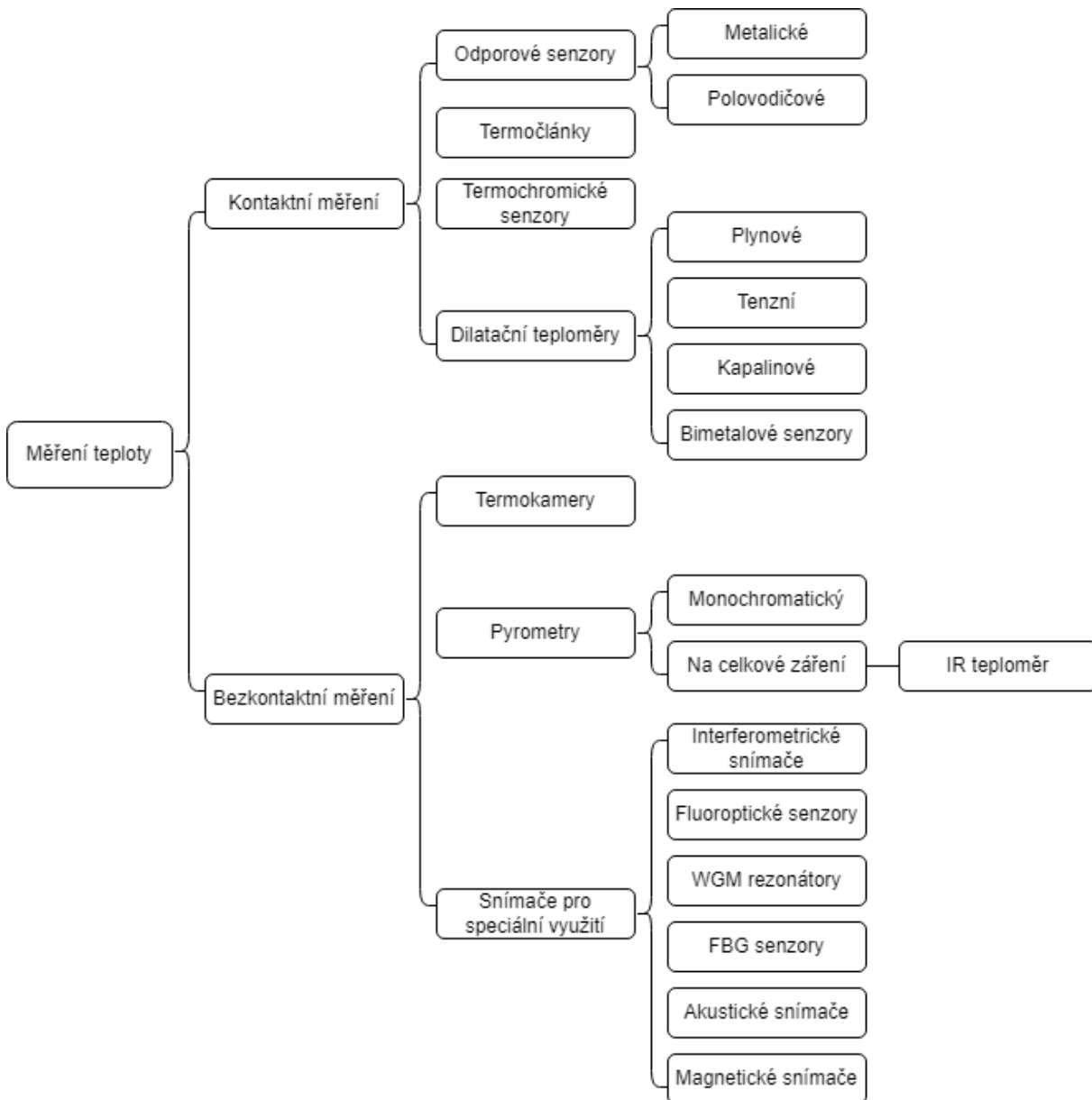
³THD – *total harmonic distortion* – celková harmonická zkreslení

⁴SNR – *signal-to-noise ratio* – poměr signál-šum

⁵ENOB – *effective number of bits* – efektivní šumové číslo

3 Rozdělení senzorů teploty

V dnešní době se senzory v základu dělí na kontaktní a bezkontaktní. Každá skupina se využívá pro jiné druhy měření a jinak se vyhodnocují výsledky. Je však možné a někdy i žádoucí používat jeden druh jako doplněk druhého v komplexních systémech měření. Další dělení pak bývá zpravidla podle fyzikálního způsobu měření teploty, ale je možné využít i dělení podle přesnosti, typu výstupního signálu, ceny, odolnosti vůči prostředí nebo jiných speciálních požadavků. Tato práce je strukturovaná podle schéma níže (obr. 3.1), tedy na kontaktní a bezkontaktní a dále podle fyzikálního způsobu měření.



Obrázek 3.1: Schéma rozdělení měřících prostředků použitého v této práci

3.1 Kontaktní senzory

Kontaktní měření teploty znamená, že senzor musí sám převzít malé množství tepelné energie od měřeného objektu a přeměnit je na elektrický signál. Senzor tedy vždy při měření narušuje stav měřeného objektu a způsobuje tak odchylku a to ať už se jedná o konvektivní, kondukční nebo i radiální výměnu tepla. Je důležité na toto nezapomínat a při návrhu měření použít prostředku, který co nejméně ovlivňuje měřené prostředí a zároveň měří v požadované přesnosti. Výše zmíněné jsou statické problémy výměny tepla, ale existují i dynamické, na které by mělo být pamatováno. Ty se projeví při změnách teploty měřeného objektu nebo v časovém horizontu kdy senzor ještě nepřijal potřebné množství tepla a neustálil se. V takových případech se při výběru senzoru sledují časové konstanty (viz 2.2) a s tím spjaté rozměry senzoru. Podrobnější popis dané problematiky lze nalézt v publikaci Handbook of Modern Sensors. [15] Kontaktní senzory jsou nejčastěji děleny podle fyzikálního způsobu využitého pro měření teploty a podle toho jsou i zde rozděleny. Přenosy dat z těchto senzorů lze nalézt v kapitole 4, jejich zpracování, zesilování bylo zmíněno v kapitole 2.

3.1.1 Odporové senzory

Tato část byla převzata z knihy Senzory a měřicí obvody[22].

Jak je již z názvu patrné, odporové senzory teploty využívají pro detekci teploty změny elektrického odporu. Mezi základní vlastnosti patří téměř lineární průběh napětí při malém rozpětí měřených teplot a díky tomu patří mezi nejpoužívanější a nejpřesnější senzory teploty. Malé teplotní rozpětí obvykle znamená ± 100 °C a v tomto intervalu můžeme závislost odporu na teplotě určit ze vztahu:

$$R_T = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot T] \quad (3.1)$$

Kde

- $R_T[\Omega]$ – elektrický odpor senzoru při dané teplotě
- $R_0[\Omega]$ – elektrický odpor senzoru při teplotě 0 °C
- $\alpha[-]$ – teplotní koeficient elektrického odporu

Teplotní koeficient elektrického odporu α vyjadřuje změnu elektrického odporu v závislosti na teplotě, čímž určuje citlivost senzoru a je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad (3.2)$$

Kde

- $R_{100}[\Omega]$ - elektrický odpor senzoru při teplotě 100 °C

Pro větší rozpětí měřených teplot nebo větší přesnost se dostáváme z linearizované aproximace na rovnici nelineární, která obsahuje více koeficientů a může se lišit podle použitého množství jednotlivých prvků v senzoru. Ve většině senzorů se setkáme se stejnými prvky platinou, niklem a mědí. Platinový a měděný senzor mají přibližně stejnou citlivost, oproti tomu nikl má citlivost přibližně dvakrát větší. Další sledovanou vlastností je měrný elektrický odpor, který vyjadřuje elektrický odpor vodiče určité délky a určitého průřezu. Pro lepší přehlednost je níže uvedena tabulka.

Tabulka 3.1: Měrný elektrický odpor prvků odporových senzorů

Název prvku	$\alpha[10^{-3} \cdot K]$	$\rho[\Omega \cdot m]$
Pt	3,85	$9,81 \cdot 10^{-8}$
Ni	6,17	$12,13 \cdot 10^{-8}$
Cu	3,9	$1,54 \cdot 10^{-8}$

Platinové odporové senzory

Dle [22] se platinové odporové senzory označují písmeny Pt, za kterými jsou číslice označující odpor senzoru při teplotě 0 °C. Nejběžněji se setkáme se senzory Pt100 a Pt1000 tedy elektrický odpor při teplotě 0 °C je 100 Ω a 1000 Ω respektivě. Pro větší rozpětí měřených teplot je závislost elektrického odporu na teplotě následující:

$$R_T = R_0 \cdot [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \quad (3.3)$$

Kde dle normy [11] jsou koeficienty:

- $A = 3,90832 \cdot 10^{-3} K^{-1}$
- $B = -5,775 \cdot 10^{-7} K^{-2}$
- $C = -4,183 \cdot 10^{-12} K^{-4}$

Platinové odporové senzory jsou vyráběny podle evropských norem (DIN¹ nebo IEC²) nebo amerických standardů (ANSI³), takže v rámci jednoho regionu jsou zaměnitelné od různých výrobců, nicméně výrobky podle amerických standardů a evropských norem navzájem zaměnitelné nejsou. Vyrábí se v několika provedeních, nejběžnější je tenký platinový drátek ve skleněném pouzdru využitelný do 600 °C avšak velice křehký, typickým příkladem použití jsou jímky v potrubí. Další je podobné konstrukce, avšak zapouzdřený v keramickém pouzdru, využitelný typicky až do 850 °C. Posledním typem je tenkovrstvý senzor, tloušťka vrstvy v řádech μm , tyto senzory jsou poměrně levnější, mají velmi rychlou odezvu a málo ovlivňují měřený povrch. [22]

Niklové odporové senzory

Niklové odporové senzory jsou označovány obdobně jako senzory platinové tedy písmeny Ni a velikostí odporu senzoru při teplotě 0 °C. Nejběžněji se setkáme se senzorem Ni120. Přesnější závislost niklového senzoru je opět nelineární a pro odpor při dané teplotě platí vztah:

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + CT^3 + DT^4 + ET^5 + FT^6] \quad (3.4)$$

Tento vztah je definován normou DIN 43760:1987[13]. Obvyklý rozsah teplot je do 200 °C. Oproti platinovým sensorům mají niklové větší citlivost, menší přesnost a jsou levnější. Jejich konstrukční provedení je obdobné jako u platinových, najdeme zde zapouzdření skleněná i keramická ale i tenkovrstvé provedení. [22]

¹DIN – *Deutsches Institut für Normung* – Německý ústav pro průmyslovou normalizaci

²IEC – *International Electrotechnical Commission* – Mezinárodní elektrotechnická komise

³ANSI – *American National Standards Institute* – Americký standardizační institut

Měděné odporové senzory

Měděné odporové senzory jsou stejně tak jako platinové i niklové označovány písmeny Cu a hodnotou elektrického odporu při teplotě 0 °C. Jejich použití je omezené a to hlavně z důvodu špatné dlouhodobé stability a malého základního odporu. Nejčastěji se setkáme se snímačem Cu10. Naopak výhodou je malá cena s porovnáním s platinovými i niklovými senzory a linearita měřeného odporu. Využití tedy najdou hlavně v krátkodobém měření teploty u elektrických strojů. [22]

Polovodičové odporové senzory

Polovodičové odporové senzory využívají tak jako kovové odporové senzory závislost odporu na teplotě a dle literatury [12] je lze dále rozdělit na termistory a monokrystalické odporové senzory.

Termistory

Termistory také využívají pro měření teploty změnu elektrického odporu, ale jedná se o polovodičové součástky. Rozlišujeme dva druhy termistorů podle statické charakteristiky a to NTC⁴ nebo též negastor a PTC⁵ nebo též pozistor. V obou případech se jedná o nelineární charakteristiku jejichž průběh má kladný koeficient pro PTC termistory a záporný koeficient pro NTC termistory. Tato nelineární závislost je dle [22] aproximována Steinhart-Hartovou rovnicí:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (3.5)$$

Kde A, B a C jsou koeficienty závislé na materiálu a obvykle je udává výrobce v katalogovém listu. Po úpravě dostaneme pro výpočet odporu následující vztah:

$$R = e^{(Y - \frac{X}{2})^{\frac{1}{3}} - (Y + \frac{X}{2})^{\frac{1}{3}}} \quad (3.6)$$

Kde:

- $X = \frac{1}{C}(A - \frac{1}{T})$
- $Y = \sqrt{(\frac{B}{3C})^3 + \frac{X^2}{4}}$

Výhodou termistorů je vysoká citlivost, ale vzhledem k nelinearitě je nutná složitější elektronika než u kovových odporových senzorů. Další velkou nevýhodou je nutnost kalibrace každého jednotlivého senzoru čímž pádem nejsou jednoduše zaměnitelné a to i v případě termistorů stejného typu od stejného výrobce. Oblast použití pro termistory je omezena maximální teplotou přibližně 150 °C, kde začínají polovodiče degradovat. V praxi se využívá linearizace v okolí určité teploty pro měření v nejbližším okolí této teploty pro zjednodušení výpočetní složitosti. [22]

⁴NTC - *negative temperature coefficient* - záporný teplotní koeficient

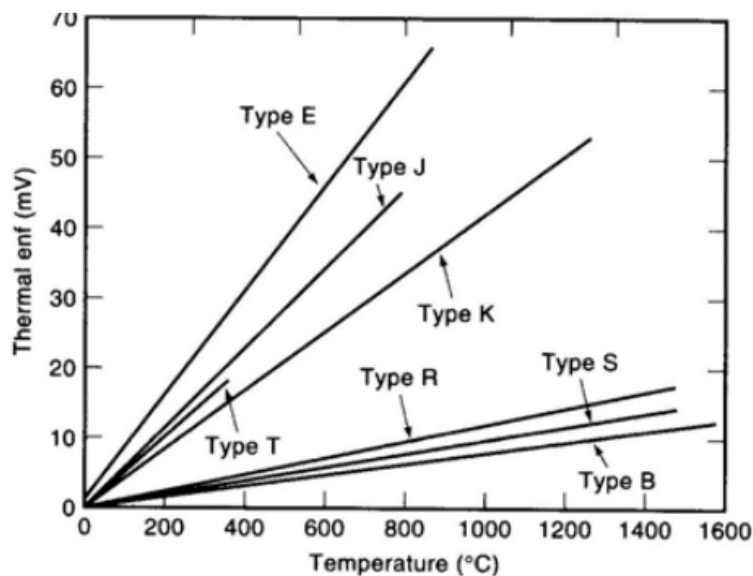
⁵PTC - *positive temperature coefficient* - kladný teplotní koeficient

Polovodičové monokrystalické senzory

Monokrystalické senzory lze realizovat z křemíku, germania, india aj. a jejich slitin[12]. V dnešní době se již vyrábí jako integrovaný obvod teplotního snímače s velkým množstvím rozsahů a je možné je najít s analogovým výstupem i s digitálním výstupem. Mezi zástupce této skupiny lze zařadit LM92 nebo LM35 od výrobce Texas Instruments⁶.

3.1.2 Termočlánky

Termoelektrické senzory neboli termočlánky jsou senzory, které využívají Seebeckova jevu. Dva různé kovy jsou na jednom konci (tzv. horký konec) svařeny a na druhém konci (tzv. studený konec) zapojeny na voltmetr. Pokud existuje rozdíl teplot na studeném a horkém konci, tak na studeném konci vznikne měřitelné termoelektrické napětí. Na rozdíl od předešlých senzorů tak neměříme změnu elektrického odporu v závislosti na teplotě, ale rozdíl teplot na koncích svařených kovových drátů. Termočlánky jsou označovány jednak písmeny a jednak pomocí barevně odlišeného pláště termočlánekového drátu. Mezi běžné termočlánky můžeme zařadit typ J vyrobený ze železa a konstantanu a typ K vyrobený ze slitiny niklu a chromu a slitiny niklu a hliníku. Mezi další patří typy B, E, N, R, S nebo T a podle typu je rozsah teplot až do několika set °C viz obrázek 3.2. Termočlánky se vyrábí ve třech provedeních. Nechráněný jak již název napovídá není nijak chráněn před okolím, má velmi rychlou odezvu, ale je vhodný pouze do suchého, nekorozivního a beztlakového prostředí. Izolovaný termočlánek je možné použít v prostředí, kde je potřeba lepší ochrana, ale je tím prodloužena časová konstanta. Poslední, uzemněný, spojuje výhody obou, ale termočlánek je vodivě spojený s jímkou a můžou se tak objevit problémy s elektromagnetickým rušením. [22]



Obrázek 3.2: Statické charakteristiky termočláneků [18]

⁶<https://www.ti.com/>

3.1.3 Dilatační senzory

Dilatační senzory využívají objemové nebo délkové roztažnosti látek v závislosti na teplotě. Jako médium jsou použity látky v plynném skupenství – plynové senzory, látky o jedné složce a dvou fázích – tenzní, látky v kapalném skupenství – kapalinové anebo látky v pevném skupenství s rozdílnou teplotní roztažností – bimetalové. Měření teploty se tím převádí na měření tlaku, objemu nebo délky.

Plynové

Tyto senzory vycházejí ze stavové rovnice plynu, tedy z toho, že tlak plynu je přímo úměrný teplotě při zachování stálého objemu.

$$p = \frac{n \cdot R}{V} \cdot T = k \cdot T \quad (3.7)$$

Kde

- $p[Pa]$ – tlak
- $n[mol]$ – látkové množství
- $R[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$ – plynová konstanta
- $V[m^3]$ – objem
- $T[K]$ – termodynamická teplota

Jejich náplní je nejčastěji dusík, hélium nebo vzduch, ale dnes se již moc nepoužívají. Teplotní rozsah je od $-50\text{ }^{\circ}C$ do $+500\text{ }^{\circ}C$.[\[19\]](#)

Tenzní

Tenzní senzory využívají závislost tenze par na teplotě, proto používají látky o jedné složce a dvou fázích. Tuto závislost lze podle[\[19\]](#) popsat rovnicí:

$$\log(p) = A - \frac{B}{T} + C \cdot \log(T) \quad (3.8)$$

Kde

- $A, B, C[-]$ – konstanty pro danou látku
- $T[K]$ – termodynamická teplota
- $p[Pa]$ – tlak v plynné fázi látky

Poslední člen v rovnici [3.8](#) se uplatňuje pouze pro větší teplotní intervaly. Teplotní rozsah závisí na použitém médiu a jeho vlastnostech. Maximální možný rozsah je mezi bodem varu při atmosferickém tlaku a tzv. kritickým bodem. Nad kritickým bodem již systém obsahuje pouze plynnou fázi a tudíž vztah [3.8](#) již neplatí.[\[19\]](#)

Kapalinové

Kapalinové senzory nebo častěji teploměry jsou běžné skleněné domácí teploměry, které známe. Dříve byly plněny výhradně rtutí, ale dnes se již spíše potkáme s obarveným ethanolem a v lékařství s galliem. Pro procesní měření jsou teploměry kovové, celé vyplněny kapalinou a zakončeny deformačním tlakoměrem. Pro změnu objemu kapalin s teplotou platí rovnice[16]:

$$V_{\vartheta} = V_0(1 + \beta \cdot \vartheta) \quad (3.9)$$

Kde

- $V_0[m^3]$ – objem kapaliny při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $V_{\vartheta}[m^3]$ – objem kapaliny při teplotě ϑ
- $\beta[K^{-1}]$ – teplotní součinitel objemové roztažnosti

Při procesním měření se využívají dva paralelně umístěné teploměry pro zmírnění vlivu kolísání teploty v okolí kapiláry jdoucí z nádoby do tlakoměru a pro kompenzaci vlivu nestejných výšek umístění teploměru a tlakoměru.[19]

Bimetalové

Dvojkovové neboli bimetalové senzory jsou vyrobeny ze dvou různých kovů s odlišným teplotním součinitelem roztažnosti[12]. Působením teplem se části z různých materiálů roztahují různým způsobem a deformuje se tak tvar snímače. Tímto způsobem se měření teploty přemění na měření polohy a přes další zařízení jako potenciometry aj. se převádí na elektrický signál. Pro lepší rozlišitelnost bývají bimetaly stočené do šroubovice popřípadě spirály. Obvyklý rozsah použití je do $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.4 Termochromické senzory

Termochromické senzory využívají vlastnosti barviv reagující na teplo proti se jim někdy říká teploměrné barvy. Jsou to nátěry ze sloučenin Hg, Ag, Cu, Pb, As, Sb aj., které po dosažení určité teploty změny barvu. Vyrábějí se v rozsahu od $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ v odstupňování od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Tvary a způsoby použití těchto barev je velmi rozmanité, nejčastěji lze nalézt nálepky, pera, kapsle a dokonce celé plochy natřené touto barvou, z čehož lze rozeznat, v kterém místě stoupne teplota nad určitou mez nejdříve.

3.2 Bezkontaktní snímače teploty

V poslední době se díky snižujícím se cenám začaly ve větším používat další druhy snímačů teploty a to snímače bezkontaktní. Svoje uplatnění najdou při měření těžko dosažitelných povrchů, při plošném měření velkých ploch nebo při měření většího rozsahu teplot. Při použití těchto snímačů je však nutné si uvědomit princip fungování a z něj vyplývající omezení.

Bezkontaktní snímače neměří přímo teploty daného povrchu, ale intenzitu vyzařování. Planckův vyzařovací zákon uvádí, že každé těleso s teplotou vyšší než absolutní nula neboli 0 K , vyzařuje záření o intenzitě závislé na teplotě podle vztahu:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (3.10)$$

Kde:

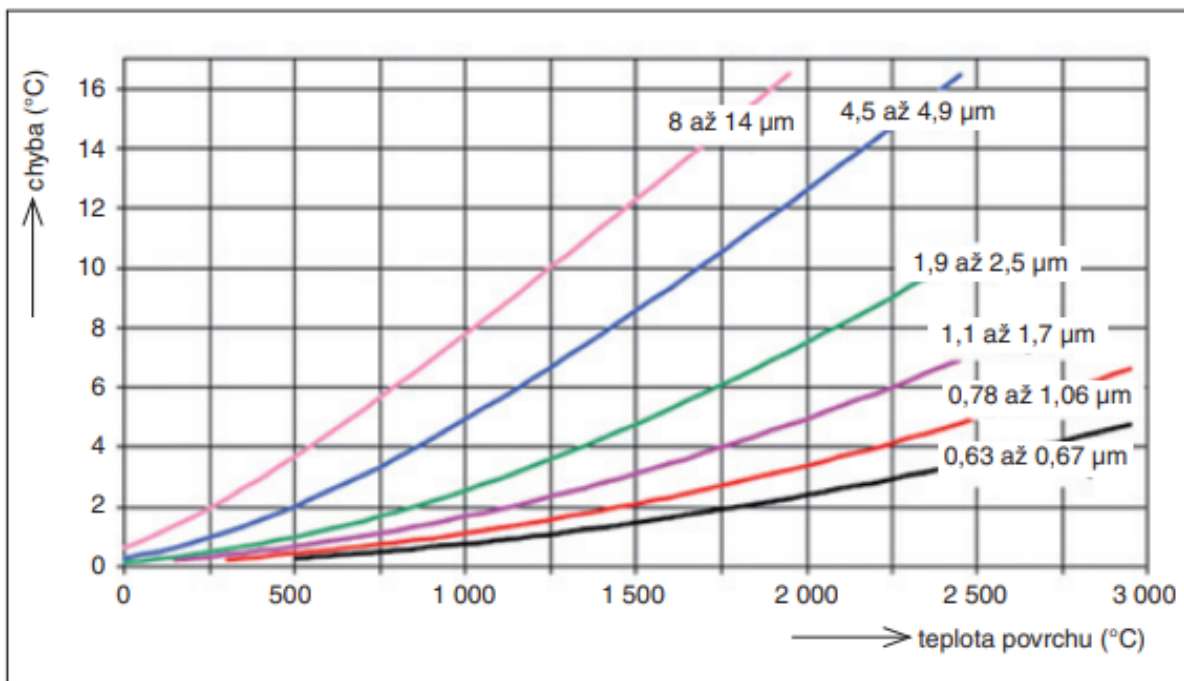
- $h[J \cdot s]$ je Planckova konstanta o velikosti $6,62606896 \cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$
- $c[m \cdot s^{-1}]$ je rychlost světla ve vakuu o velikosti $299792458\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $k[J \cdot K^{-1}]$ je Boltzmannova konstanta o velikosti $1,38064852 \cdot 10^{-23}\text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
- $T[K]$ je termodynamická teplota
- $\nu[Hz]$ je frekvence vyzařování [22]

Měření intenzity záření s sebou tedy nese nevýhody v podobě dopadajícího záření z jiných zdrojů než z těch, které mají být změřeny. Tomu lze předejít nebo alespoň zmírnit dopady správnou metodikou měření. Teplota se dá zjistit změřením celkové dopadající energie, použito u pyrometrů na celkové záření, nebo změřením dopadající energie o určité vlnové délce, monochromatické pyrometry.

Dalším problémem je emisivita. Pojem emisivita je definován pomocí ideálního černého tělesa, tedy objektem, který teoreticky pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek a zároveň vyzařuje nejvyšší možné množství energie ze všech myslitelných těles, je tedy ideálním zářičem. Emisivita reálného objektu se ale odvíjí od materiálu, povrchu, jeho barvě, samotné teplotě a na vlnové délce použité k měření. Musíme tak vědět správnou emisivitu daného povrchu pro zjištění absolutní teploty. Toto je možné obejít, protože i bez tohoto nastavení ukazují pyrometry teplotní rozdíly a pokud je určena absolutní teplota v jednom místě povrchu pomocí jiného teplotního snímače, může být odvozeno celé teplotní pole. Jak již bylo uvedeno, měření probíhá bezkontaktně tedy záření musí mezi měřeným povrchem a snímačem projít atmosférou nebo jiným materiálem, kde může docházet k útlumu. Proto je nutné pro měření vybrat i správnou vlnovou délku, na které dochází k nejmenšímu útlumu. [22] Jak je patrné, bezkontaktní měření má sice velké možnosti využití, na druhou stranu s sebou nese nevýhody v podobě odborného nastavování parametrů v použitém snímacím zařízení a tím i větší nároky na obsluhu a zaškolení.

3.2.1 Termokamery a pyrometry

Pro bezkontaktní měření se běžně používají termokamery a pyrometry. Obě skupiny přístrojů mají některé společné vlastnosti, které jsou uvedeny zde a ostatní, které jsou uvedeny v podkapitolách jednotlivých přístrojů. Pyrometry zobrazují jednu průměrnou hodnotu teploty z dané měřené oblasti, oproti tomu termokamery vytvářejí dvourozměrné teplotní pole tzv. termogram. Díky tomu se obecně pyrometry považují za specializované přístroje a termokamery za přístroje univerzální.[25] U obou přístrojů dochází k měření pomocí intenzity tepelného záření, proto je nutné správně zadat parametry měření, jak bylo předesláno výše, jako je emisivita, teplota atmosféry, relativní vlhkost, zdánlivou odraženou teplotu nebo vzdálenost mezi měřeným objektem a přístrojem. Podle [25] by se dalo říci, že termokamery vždy umožňují nastavení emisivity a zdánlivé odražené teploty a v některých případech i parametry atmosféry. Pyrometry vždy umožňují nastavit emisivitu a v některých případech zdánlivou odraženou teplotu, kdežto nastavení dalších parametrů není u pyrometrů obvyklé. Oba typy přístrojů lze také nalézt s podobnou přesností a teplotním rozsahem. Přesnost se v současnosti pohybuje kolem $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozsahy je možné obecně uvést od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+3500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25]. Důležitost správného nastavení parametru emisivity je patrné z obrázku 3.3, kde jsou vidět značné rozdíly ve výsledné měřené teplotě.



Obrázek 3.3: Velikost chyby při změně emisivity o 1 % v závislosti na teplotě povrchu a spektrálním rozsahu měřícího přístroje [25]

Termokamery

Termokamery se využívají pro vyhodnocování teploty nebo lépe teplotního pole měřené oblasti nebo objektu. Své uplatnění nalézají v široké škále oborů od stavitelství až po laboratorní měření. Dnes je na trhu k nalezení velké množství různých typů termokamer, které mají různé funkce a proto je nutné si před nákupem ujasnit co se požaduje pro dané měření. Oproti vizuální kontrole a interpretaci teplotního pole mají totiž termokamery i měřící funkce ke kterým patří: bodové měření, oblastní měření, teplotní profil, funkce izoterma, teplotní prolnutí, blinding, MSX⁷, obraz v obraze nebo radiometrické video. Podrobný popis těchto funkcí lze nalézt na stránkách zabývajících se termokamerami [27].

Monochromatický pyrometr

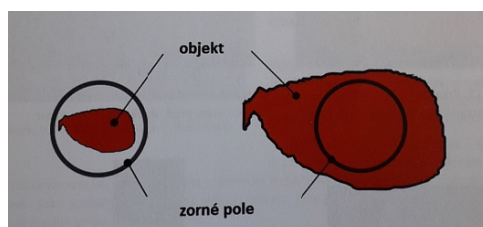
Monochromatické pyrometry se používají pro měření na jedné vlnové délce, obvykle 650 nm. Takový pyrometr obsahuje optický systém, který přes červený filtr soustředí záření objektu na pyrometrickou žárovku a porovnává intenzitu vyzařování na jedné vlnové délce. Nastavováním proudu se ovládá teplota vlákna a v objektivu je vidět světlejší vlákno v případě vyšší teploty vlákna než objektu nebo obráceně. Pokud je vidět vlákno se stejnou světlostí jako má pozorovaný objekt, vlákno v zorném poli splyne s okolím. Takové pyrometry je možno použít například pro měření teploty kovů a skla při tavení a dalších úpravách. [22]

Pyrometr na celkové záření

Tento pyrometr se strukturou velice podobá předchozímu, ale namísto porovnávání jasů objektu, měří přímo intenzitu dopadajícího záření. Záření objektu je optickým systémem přes šedý filtr soustředěno na kontaktní snímač teploty, což bývá obvykle termočlánek nebo termistor. Pyrometry na celkové záření jsou tak použitelné především pro objekty s vlastnostmi velmi blízkými černého tělesa. [22]

IR teploměr

Infračervené teploměry neboli IR teploměry patří mezi pyrometry na celkové záření. Při měření je důležité správné použití, jelikož každý IR teploměr má danou velikost zorného pole. Tedy neměří v jednom bodě, ale v určité ploše. Pro správné měření je tedy nutné, aby celé zorné pole teploměru leželo uvnitř měřeného objektu, jak je patrné z obrázku 3.4, a nebylo tak měřeno i vyzařování pozadí. [22]



Obrázek 3.4: Zorné pole IR teploměru [22]

⁷MSX – *multi-spectral dynamic imaging* – multispektrální zobrazení

3.2.2 Speciální snímače a senzory

V této kapitole jsou představeny snímače a senzory, které se dají označit jako speciální nebo specializované. Především se liší od předchozích tím, že nejsou běžně používané ve velkém množství a mají některé vlastnosti vhodné jen do určité oblasti výzkumu či vývoje. Na takovéto snímače je možno narazit pokud při hledání přístroje s velmi vysokým rozlišením, přístroje pro měření velmi malých teplot nebo pokud je potřeba měřit v nepříznivém prostředí. Jejich dostupnost na trhu bývá nízká, není mnoho výrobců a často vznikají pouze v rámci nějaké zakázky nebo studie. Proto i cena nebývá lehce zjistitelná nebo je závislá na požadovaném množství. Názvy těchto měřících přístrojů jsou často odvozeny od principu fungování. Lze si povšimnout, že v některých případech se teplota objevuje jako nežádoucí závislost při měření jiných veličin a toho je využito ve prospěch přesného měření právě teploty.

Fluoroptické senzory

Fluoroptické senzory využívají schopnosti fosforu vydávat fluorescentní signál na excitaci světlem. Sloučeniny s obsahem fosforu mohou být nanесeny přímo na měřený povrch a osvětleny UV⁸ pulsem, kde se následně sleduje světelná odezva. Podle času této odezvy se zjišťuje teplota daného objektu. Jinými slovy časová konstanta poklesu intenzity určuje teplotu v rozsahu od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností okolo $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako nanášený materiál se používá fluoromagnetit hořčnatý aktivovaný čtyřmocným manganem.[15]

Interferometrické snímače

Interferometrické měření je další z optických metod. Je založeno na interferenci dvou paprsků světla, přičemž jeden je referenční a druhý prochází měřeným médiem. Výsledkem je fázový posuv paprsku procházejícího médiem v závislosti na teplotě. Nejčastěji se jako médium pro měření teploty využívá tenká vrstva křemíku. Tyto senzory mají použitelnost do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ v levnějších verzích a až $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ v dražších verzích, kde se jako zdroj světla používá LED⁹ ve vlnové délce 860 nm a microoptický spektrometr.[15]

WGM rezonátory

WGM^{10 11} rezonátory patří do senzory super vysokého rozlišení, využity jsou převážně pro kalorimetry, radioastronomii a podobné oblasti s požadavky na přesnost měření. V laboratorních bylo dosaženo rozlišení až $30\text{ nK}/\sqrt{Hz}$ použitím isotropického krystalického WGM senzoru. To znamená, že bylo možné změřit termální aktivitu jednotlivých atomů.[15] Pro potřeby této práce není potřeba dále rozebírat a další informace je možné nalézt v již citované učebnici [15] nebo například na stránkách Národního centra biotechnologických informací¹².

⁸UV – *ultraviolet* - ultrafialové záření

⁹LED – *light-emitting diode* – elektroluminiscenční dioda

¹⁰WGM – *whispering gallery mode* – druh vlny, která může cestovat kolem konkávního povrchu, původně objevená pro zvukové vlny ve „Whispering gallery“ Katedrály sv. Pavla

¹¹https://en.wikipedia.org/wiki/Whispering-gallery_wave

¹²<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4786191/>

FBG senzory

FBG¹³ senzory vynikají především odolností proti elektromagnetickému rušení, absencí elektricky vodivých součástí, stabilitou a možností řetězit senzory za sebou v jednom vláknu. Teplotní roztažnost vláken zapříčiňuje rozdíl vzdáleností mřížek a tím rozdílné indexy lomu. Závislost teploty lze podle [15] vyjádřit jako:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha_L + \alpha_n) \cdot T \quad (3.11)$$

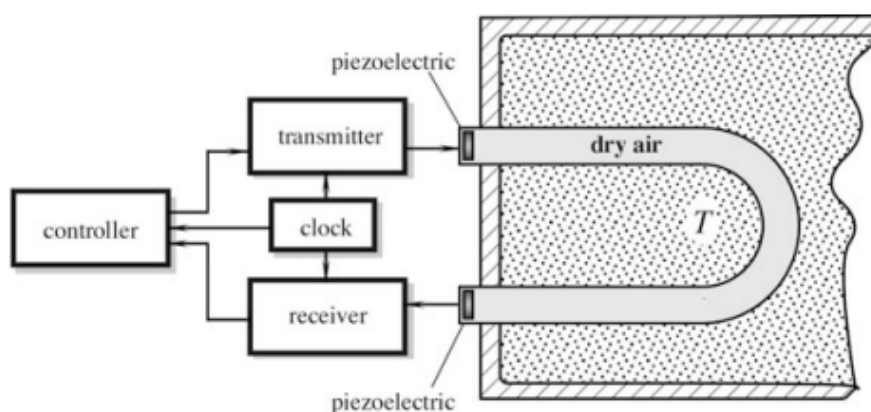
Kde:

- $\alpha_L = 0,55 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- $\alpha_n = 6,67 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- $\lambda[m]$ je vlnová délka

Posun vlnové délky se dále analyzuje a jeho velikost je lineárně závislá na teplotě při omezeném rozsahu hodnot. Tyto senzory najdou využití především v kosmické technice, stavitelství, biomedicínském inženýrství a v tzv. chytrých strukturách pro kontinuální monitorování.

Akustické snímače teploty

Pro akustické snímače teploty se běžně používá název akustický teploměr a založen na teplotní změně rychlosti zvuku v ideálním plynu. Využití najdou v metrologii.[12] Používají se v extrémních podmínkách jako jsou velmi nízké teploty, v prostředí vysoké radiace nebo v uzavřených prostředích se známým médiem, do které nelze vložit kontaktní teploměr. Tyto snímače využívají závislosti rychlosti zvuku na teplotě prostředí. Skládá se ze tří komponent: vysílače, přijímače a hermeticky uzavřenou trubicí. Vysílač a přijímač jsou pak synchronizovány a ovládací obvod vypočítá z doby a známé dráhy rychlost zvuku, kterou přepočte na teplotu.[15]



Obrázek 3.5: Akustický snímač teploty s ultrazvukovou detekcí [15]

¹³FBG – *fiber bragg grating* – optická vláknová mřížka

Piezoelektrické snímače teploty

Piezoelektrický jev, tedy generování elektrického napětí při deformování, je dobře známý a využitý pro měření především tlaku, je však závislý i na teplotě a tím pádem využitelný i pro měření teploty. Dle[15] by se teplotní závislost dala aproximovat polynomem 3. řádu:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta T^2 + a_3 \Delta T^3 \quad (3.12)$$

Kde:

- $T[K]$ je teplota
- $f[Hz]$ je frekvence
- $f_0[Hz]$ je kalibrační frekvence
- $a[-]$ jsou koeficienty

Přičemž již roku 1962 společnost Hewlett-Packard vyvinula krystal s lineární závislostí použitím správného řezu. Dnes se již využívá mikroprocesorů a tím pádem nejsou takové požadavky na lineární modely. Normální teplotní rozsahy můžeme očekávat od $-80\text{ }^\circ\text{C}$ do $230\text{ }^\circ\text{C}$ s přesností $0,02\text{ }^\circ\text{C}$. Oproti jiným sensorům však bývá pomalejší odezva na změnu měřené teploty.[15]

Magnetické snímače teploty

Tato část byla převzata z knihy Senzory a měřicí obvody [12].

Tyto snímače jsou vhodné v oblasti extrémně nízkých teplot od jednotek mK do 20 K. Princip spočívá v měření magnetické susceptibility paramagnetických solí (např. dusičnan cerito-hořečnatý). Pro výpočet teploty se používá vztahu magnetické susceptibility:

$$\kappa \approx \frac{C}{T} \quad (3.13)$$

Kde:

- $C[K]$ je Curierova teplota
- $\kappa[-]$ je magnetická susceptibilita

4 Přenos dat

V dnešním vědeckém a průmyslovém prostředí hraje sběr a přenos dat z různých senzorů a snímačů zásadní roli pro monitorování a řízení různých procesů. To samozřejmě platí i pro přenos a sběr dat z měření teploty. Přenos dat ze snímání teploty lze realizovat různými způsoby, které lze rozdělit na bezdrátové technologie a přenos dat pomocí optických a metalických kabelů.

Bezdrátová komunikace nabízí flexibilitu a snadnou instalaci, což umožňuje snímače umístit na obtížně přístupná místa a eliminuje nutnost vedení kabelů. Zde se využívají různé bezdrátové protokoly, jako je Wi-Fi¹, Bluetooth, Zigbee nebo LoRa², které umožňují přenos dat mezi teplotními senzory a centrálními systémy. Tato technologie je ideální pro situace, kdy je potřeba rozsáhlé pokrytí nebo je obtížné pokládat kabely.

Na druhé straně, přenos dat pomocí optických a metalických kabelů nabízí vyšší spolehlivost a větší přenosovou rychlost. Optické kabely využívají světelných signálů pro přenos dat a jsou odolné vůči elektromagnetickým rušením. Jsou často používány na dlouhé vzdálenosti a v prostředí s vysokým rizikem elektromagnetického rušení. Metalické kabely, jsou cenově příznivější a snadno dostupné. Jsou využívány na krátké a střední vzdálenosti.

4.1 Přenos optickými a metalickými kabely [35]

V oblasti přenosu dat se metalické a optické kabely staly klíčovými prvky pro spolehlivý a rychlý přenos informací. Tyto kabely se využívají v široké škále aplikací, včetně telekomunikace, datových center, průmyslové automatizace a domácích sítí.

Metalické kabely, zejména měděné kabely, jsou široce používány pro přenos elektrických signálů. Měď je vynikajícím vodičem elektrického proudu a umožňuje spolehlivý přenos dat. Metalické kabely jsou dostupné, cenově efektivní a snadno se instalují.

Na druhou stranu, optické kabely jsou založeny na principu přenosu světelných signálů pomocí vláken z průhledného materiálu, jako je sklo nebo plast. Optické kabely nabízejí výhody, jako je vysoká kapacita přenosu dat, odolnost vůči elektromagnetickému rušení, menší ztráty signálu na větší vzdálenosti a vyšší bezpečnost přenosu dat.

4.1.1 Druhy používaných kabelů

Při měření teploty je kvalitní a spolehlivé přenosové médium klíčovým faktorem pro správnou a přesnou komunikaci mezi snímači teploty a sběrnými systémy. Existuje několik typů kabelů, které jsou běžně používány v aplikacích měření teploty. Každý z těchto typů kabelů má své specifické vlastnosti a výhody, které je důležité zvážit při návrhu a implementaci měřicího systému. Níže je výčet nejčastěji používaných typů kabelů v přenosu informací při měření teploty:

- **Koaxiální kabely** jsou velmi běžným typem kabelů používaných v měřicích systémech pro přenos teplotních signálů. Tyto kabely mají jeden středový vodič obklopený izolací a vnějším vodičem, který slouží jako stínění. Koaxiální kabely poskytují vysokou odolnost proti elektromagnetickému rušení, což je důležité při přesném měření teploty.

¹Wi-Fi – *Wireless Fidelity* – bezdrátová věrnost

²LoRa – *Long Range* – Dlouhý dosah

- **Kroucené páry** také známé pod anglickým názvem *Twisted pair* jsou kabely, které mají dva izolované vodiče, které jsou mezi sebou kroucené. Tento typ kabelu se často používá pro digitální komunikaci, jako je RS485 nebo Ethernet. Kroucené páry poskytují vysokou odolnost proti rušení a jsou schopny přenášet data na delší vzdálenosti.
- **Jednovodičové kabely** jsou jednoduché kabely s jedním vodičem pro přenos signálu. Tyto kabely se často používají pro analogovou komunikaci, jako je 4-20 mA proudové rozhraní. Jednovodičové kabely jsou obvykle méně odolné vůči rušení, ale jsou snadno dostupné.
- **Optický kabel** je speciální typ kabelu složený z jednoho nebo více optických vláken, obalených ochrannou vrstvou zvanou plášť, které přenáší světelné signály. Optické vlákno poskytuje vysokou odolnost proti elektromagnetickým rušením a umožňuje přenos dat na velké vzdálenosti. Optický kabel se často používá v aplikacích, kde je potřeba přenášet teplotní signály na velké vzdálenosti nebo v prostředí s vysokým rušením.

Kabely jsou pouze fyzickým médiem pro přenos signálu a dat mezi zařízeními. Je potřeba zajistit i soubor pravidel, které určují, jaká data se přenášejí, jakým způsobem se přenášejí a jak jsou interpretována na straně přijímacího zařízení a k tomu slouží protokoly.

4.1.2 Protokoly pro přenos dat

Při použití kabelů pro komunikaci se musí dodržovat přesně stanovený protokol, který definuje komunikační formát, způsob kódování dat, synchronizaci a další aspekty přenosu dat. Protokol zajišťuje, že přijatá data jsou správně interpretována a zpracována na straně přijímacího zařízení. Díky tomu jsou zabezpečeny následující vlastnosti přenosu:

- **Kompatibilita** – Protokoly umožňují zařízením komunikovat mezi sebou a zajistit jejich vzájemnou kompatibilitu. Díky standardizovaným protokolům mohou různá zařízení od různých výrobců spolupracovat a vyměňovat si data bez problémů.
- **Efektivita a rychlost** – Protokoly byly navrženy tak, aby umožnily rychlý a efektivní přenos dat. Každý protokol má své specifické vlastnosti a optimalizace, které umožňují efektivní využití šířky pásma a minimalizaci ztrát dat během přenosu.
- **Spolehlivost** – Protokoly zajišťují spolehlivý přenos dat a zabývají se záležitostmi, jako jsou chybové kontroly, oprava chyb a zpracování potvrzení o přijetí dat. Tím se minimalizuje riziko chyb a zajišťuje se, že data jsou přenesena bez ztrát nebo poškození.
- **Flexibilita** – Protokoly nabízejí různé funkce a možnosti, které umožňují přizpůsobení komunikace podle konkrétních potřeb a požadavků aplikace. Například některé protokoly umožňují více zařízení na jedné sběrnici nebo dvousměrnou komunikaci.
- **Bezpečnost** – Některé protokoly, zejména ty používané v průmyslových nebo kritických systémech, mají významnou roli při zajištění bezpečnosti datového přenosu. Zahrnují funkce, jako je šifrování dat, ověřování identity a další mechanismy, které chrání integritu a důvěrnost dat.

V oblasti komunikačních protokolů existuje mnoho různých standardů a technologií, které umožňují přenos dat mezi zařízeními. Zde je seznam těch nejznámějších a nejčastěji používaných protokolů.

HART³

HART je hybridní komunikační protokol, který kombinuje analogový a digitální přenos dat. Používá se často ve spojení s metalickými kabely a proudovou smyčkou 4-20 mA. HART umožňuje dvousměrnou komunikaci, což znamená, že snímač teploty může nejen poskytovat teplotní údaje, ale také přijímat konfigurační a diagnostické příkazy.[5]

SPI⁴

SPI je sériové komunikační rozhraní, které se často používá pro přenos dat mezi mikrokontroléry a snímači teploty. Přenos dat probíhá po metalických vodičích, jako jsou měděné kabely. SPI je synchronní protokol, který umožňuje rychlý a spolehlivý přenos dat mezi zařízeními.[10]

RS422

RS422 je standard pro vyváženou diferenciální sériovou komunikaci. Tento protokol využívá dvojici metalických vodičů pro přenos dat a je známý svou odolností vůči elektromagnetickým rušením. RS422 je často využíván pro přenos dat ze snímačů teploty na větší vzdálenosti.[29]

RS485

RS485 je další standard pro sériovou komunikaci, který umožňuje použití více zařízení na jednom vedení. Tento protokol využívá diferenciální přenos dat po metalických vodičích, což zvyšuje odolnost vůči rušení. RS485 je často používán pro přenos dat z několika snímačů teploty ve víceuživatelských systémech.[29]

I2C⁵

I2C je sériový komunikační protokol, který umožňuje komunikaci mezi mikrokontroléry a periferními zařízeními, včetně snímačů teploty. I2C využívá dva vodiče (sériovou datovou linku a hodinový signál) a podporuje více zařízení na jedné sběrnici.[2]

CAN⁶

CAN je robustní sériový komunikační protokol, který je často používán v průmyslových aplikacích. CAN umožňuje spolehlivý přenos dat mezi různými zařízeními, včetně snímačů teploty, a je známý svou odolností vůči rušení. Tento protokol je často implementován pomocí metalických kabelů.[23]

³HART – *Highway Addressable Remote Transducer* – adresovatelný dálkový převodník

⁴SPI – *Serial Peripheral Interface* – Sériové periferní rozhraní

⁵I2C – *Inter-Integrated Circuit* – Obvod s vnitřní integrací (český překlad se nepoužívá)

⁶CAN – *Controller Area Network* – řídicí oblastní síť

PROFIBUS⁷

PROFIBUS je široce používaný komunikační protokol v průmyslovém prostředí. Existují dvě hlavní varianty: PROFIBUS DP (*Decentralized Periphery*) a PROFIBUS PA (*Process Automation*). PROFIBUS DP se používá pro přenos dat mezi řídicími systémy a periferními zařízeními, včetně snímačů teploty. Používá se typicky metalický kabel s RS485 fyzickou vrstvou. PROFIBUS PA je optimalizován pro použití v procesní automatizaci a využívá dvou vodičový, jednoduchý, intrinsicky bezpečný kabel pro přenos dat.[8]

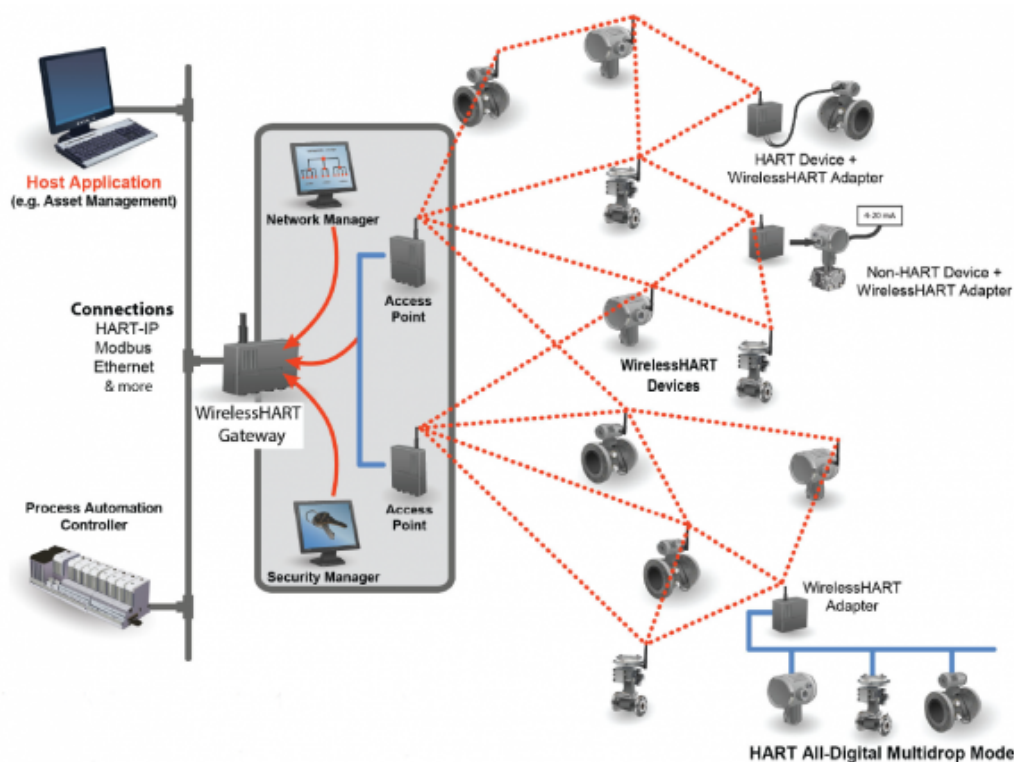
⁷PROFIBUS – *Process Field Bus* – procesní sběrnice

4.2 Bezdrátový přenos

Pro bezdrátový přenos dat z teplotních senzorů se používají různé bezdrátové technologie. Z průmyslového prostředí, kde se začali implementovat již dříve je možné zmínit například WirelessHART, WIA-PA nebo ISA 100.11a. Nicméně v poslední době zažívá velký rozvoj automatizace pro menší systémy nebo i pro domácí použití, kde se využívá technologií jako je Bluetooth, WiFi, Zigbee, LoRaWAN a další. Každá z těchto technologií má své výhody a nevýhody v závislosti na konkrétní aplikaci a prostředí.

WirelessHART

Jedná se o protokol pro bezdrátovou komunikaci průmyslových zařízení, který využívá samoorganizující se síť, tedy velmi robustní síťovou topologii. Díky tomu lze data směřovat nejen k centrálnímu zařízení, ale i mezi zařízeními a tak zvětšovat rozsah sítě nebo vytvářet redundantní cesty, tím má ve výsledku velmi dobrou spolehlivost. Dále je u této technologie kladen důraz na bezpečnost a komunikace je šifrována podle standardu FIPS⁸-197. Na obrázku 4.1 je vidět rozmanitost takové sítě a robustní topologie se senzory, adaptéry, opakovači a bránou.[30] Pro více informací doporučuji publikaci IEC 62591 WirelessHART, System Engineering Guide[3].



Obrázek 4.1: Komunikační síť WirelessHART [30]

⁸FIPS – *Federal Information Processing Standard* – Federální informační procesní standard

ISA⁹ 100.11a

Jedná se o opět o protokol, který je velmi podobný WHART, co se topologie týče, nicméně tento protokol definuje pouze 1. a 2. úroveň v modelu OSI¹⁰. Využívá TDMA¹¹, adresy o délce až 128 bitů a menší přenosovou rychlost. Naopak nabízí lepší spojení na delší vzdálenosti.[14]

WIA-PA¹²

WIA-PA patří spolu s WHART a ISA 100.11a mezi hlavní tři hráče v bezdrátové komunikaci v průmyslové praxi. Podporuje širokou škálu senzorů a staví se v podobě mesh sítě. Pro nalezení výhod a nevýhod použití je zapotřebí se detailně podívat na všechny tři, to je velmi dobře zpracováno v článku čínských studentů [33].

Bluetooth

Bluetooth je bezdrátová technologie pro krátkodobý a malý objem přenosu dat. Používá se v průmyslové praxi zejména pro přenos dat z teplotních senzorů v laboratoři nebo v menších průmyslových prostorách. Bluetooth využívá krátký dosah a vysokou rychlost přenosu dat.[9]

Wi-Fi

Wi-Fi je bezdrátová technologie pro přenos dat na větší vzdálenost a pro větší objemy dat. V průmyslové praxi se Wi-Fi často používá pro přenos dat z teplotních senzorů umístěných v průmyslových halách nebo jiných větších průmyslových prostorách. Wi-Fi umožňuje rychlý přenos dat a umožňuje jednoduché propojení s různými zařízeními a softwarovými aplikacemi.[34]

LoRaWAN¹³

LoRaWAN je bezdrátový protokol pro dlouhé dosahy a nízkou spotřebu energie, který se v průmyslové praxi používá pro přenos dat z teplotních senzorů umístěných v rozsáhlých průmyslových areálech nebo na venkově. LoRaWAN umožňuje přenos dat na vzdálenosti až několik kilometrů a umožňuje vytváření sítí s velkým počtem senzorů.[20][4]

⁹ISA – *International Society of Automation* – Mezinárodní společnost pro automatizaci

¹⁰OSI – *Open Systems Interconnection* – propojení otevřených systémů

¹¹TDMA – *time division multiplex acces* – řízení přístupu časovým multiplexem

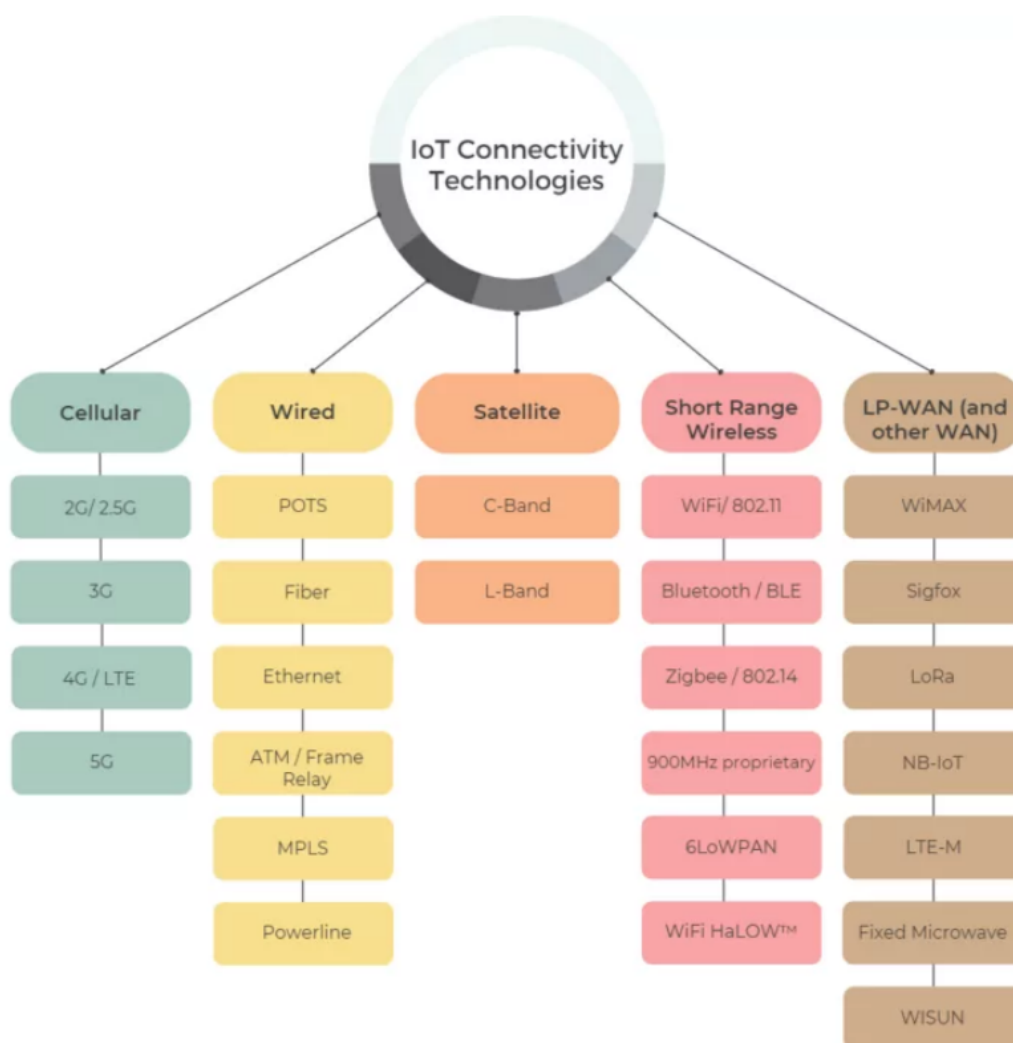
¹²WIA-PA – *wireless networks for industrial automation process automation* – bezdrátová síť pro průmyslovou automatizaci

¹³LoRaWAN – *Long Range Wide Area Network* – Síť s dlouhým dosahem

Internet of Things

IoT je koncept, který popisuje síť propojených fyzických zařízení, senzorů, softwaru a dalších objektů, které jsou schopny komunikovat a vyměňovat si data prostřednictvím internetu. Tato propojená síť umožňuje zařízením vzájemně spolupracovat a provádět různé úkoly bez přímého lidského zásahu.

IoT má širokou škálu aplikací a je využíváno v různých odvětvích, včetně domácností, průmyslu, zdravotnictví, dopravy, energetiky a městské infrastruktury. Například v domácnostech mohou být chytrá zařízení propojena s domácí sítí a umožňovat dálkové řízení a monitorování různých zařízení a systémů, jako jsou osvětlení, topení, zabezpečovací systémy apod. Následující technologie jsou založeny na stejném základě IoT, proto je pro přehled uveden obrázek 4.2 a následně jsou popsány technologie s významným zastoupením na trhu.



Obrázek 4.2: Technologie založené na IoT [7]

Zigbee

Zigbee je bezdrátový protokol pro sítě s nízkou spotřebou energie a krátkými dosahy. Zigbee se v průmyslové praxi používá pro přenos dat z teplotních senzorů umístěných v budovách a dalších menších prostorách. Zigbee umožňuje vytváření sítí s velkým počtem senzorů a umožňuje jednoduchou integraci s různými softwarovými aplikacemi.[17]

Cellular IoT

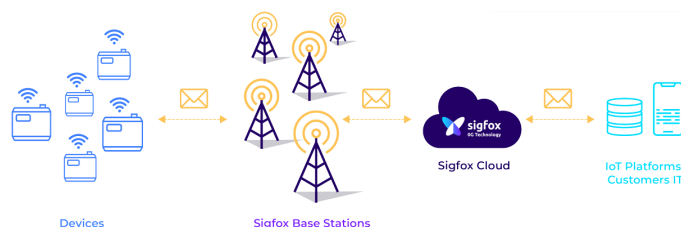
Je bezdrátová technologie pro přenos dat na velké vzdálenosti. Cellular IoT se v průmyslové praxi používá pro přenos dat z teplotních senzorů umístěných v odlehlých průmyslových oblastech nebo na velké vzdálenosti od městských center. Cellular IoT umožňuje rychlý a spolehlivý přenos dat a umožňuje jednoduchou integraci s různými softwarovými aplikacemi.[31]

NB-IoT¹⁴

Další bezdrátovou technologií, která se používá pro přenos dat z teplotních senzorů, je NB-IoT. Jedná se o technologii pro přenos dat z IoT zařízení přes mobilní sítě, která je optimalizovaná pro malá a často odesílaná data. NB-IoT umožňuje pokrytí oblastí s nízkou signální úrovní a podporuje velký počet připojených zařízení.[1][4]

Sigfox

Sigfox je další technologií pro bezdrátový přenos dat, která se používá pro IoT aplikace, včetně teplotních senzorů. Sigfox umožňuje přenos malého množství dat na velké vzdálenosti s nízkou spotřebou energie. Signál Sigfox je robustní a umožňuje komunikaci v místech s nízkou signální úrovní, jako jsou například sklepy, garáže a další uzavřené prostory.[6][4]



Obrázek 4.3: Schéma komunikace pomocí Sigfox [6]

¹⁴NB-IoT – *Narrowband Internet of Things* – úzkopásmový internet věcí

4.3 Srovnání

V praxi se tyto technologie a protokoly často kombinují a integrují s různými cloudovými platformami a softwarovými aplikacemi, aby umožnily snadný a efektivní přenos.

Při výběru bezdrátové technologie pro přenos dat z teplotních senzorů je důležité zvážit faktory jako jsou dosah signálu, přenosová rychlost, spolehlivost a bezpečnost přenosu dat. Je také důležité zvážit faktor nákladů, které mohou být vyšší než u kabelových řešení. Níže jsou uvedeny vlastnosti 4 nejpoužívanějších technologií.

Bluetooth

- Dosah signálu: obvykle několik metrů, v závislosti na verzi Bluetooth
- Přenosová rychlost: obvykle 1-3 Mbit/s, v závislosti na verzi Bluetooth
- Spolehlivost: dobře se osvědčil v osobních zařízeních, ale v průmyslových aplikacích může být náchylný k rušení
- Bezpečnost přenosu dat: výborná, Bluetooth používá šifrovaný přenos dat

Wi-Fi

- Dosah signálu: několik desítek metrů, v závislosti na konfiguraci sítě a prostředí
- Přenosová rychlost: obvykle několik desítek Mbit/s až několik stovek Mbit/s, v závislosti na konfiguraci sítě
- Spolehlivost: dobře se osvědčil v průmyslových aplikacích, ale může být náchylný k rušení
- Bezpečnost přenosu dat: vysoká, WiFi používá šifrovaný přenos dat a další bezpečnostní funkce

Zigbee

- Dosah signálu: obvykle několik desítek metrů, v závislosti na konfiguraci sítě a prostředí
- Přenosová rychlost: obvykle 250 kbit/s, ale může být až 2,4 Mbit/s
- Spolehlivost: velmi spolehlivý v průmyslových aplikacích, navržený speciálně pro IoT sítě a senzorové sítě
- Bezpečnost přenosu dat: vysoká, Zigbee používá šifrovaný přenos dat a další bezpečnostní funkce

LoRaWan

- Dosah signálu: až několik desítek kilometrů, v závislosti na konfiguraci sítě a prostředí
- Přenosová rychlost: obvykle několik set bit/s až několik desítek kbit/s, v závislosti na konfiguraci sítě
- Spolehlivost: velmi spolehlivý v průmyslových aplikacích, navržený pro dlouhodobou komunikaci na velké vzdálenosti
- Bezpečnost přenosu dat: vysoká, LoRa používá šifrovaný přenos dat a další bezpečnostní funkce

Všechny tyto technologie mají své výhody a nevýhody, co se týče nákladů a výkonu. Například Bluetooth Low Energy a Zigbee jsou relativně levné a energeticky úsporné, což z nich dělá vhodné volby pro menší vzdálenosti přenosu dat. Sigfox a NB-IoT jsou dražší, ale umožňují přenos dat na větší vzdálenosti, a jsou proto vhodnější pro aplikace, které vyžadují delší dosah.

Pokud jde o výkon, Bluetooth Low Energy a Zigbee mají vysokou přenosovou rychlost a krátkou odezvu, což je výhodné pro aplikace, které vyžadují rychlou odezvu a vysokou přenosovou rychlost. Na druhé straně Sigfox a NB-IoT mají nižší přenosovou rychlost, ale jsou vhodné pro aplikace s malým množstvím dat, které nevyžadují vysokou přenosovou rychlost.

Výběr bezdrátové technologie pro přenos dat z teplotních senzorů by měl zohledňovat požadovanou vzdálenost přenosu, množství dat, spotřebu energie a další požadavky aplikace, aby bylo dosaženo optimálního poměru mezi náklady a výkonem.

5 Nejistoty měření

„Nejistota výsledku měření je odrazem nedostatku exaktních znalostí hodnoty měřené veličiny.“ [26]

Pro vyjádření nejistot měření existuje několik různých metod, avšak nejčastěji se postupuje podle metodického pokynu GUM¹ vydaným Mezinárodním úřadem pro míry a váhy (BIPM²), jehož překlad v českém jazyce vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

Následující část „Teoretický úvod do nejistot“ vychází právě z výše zmíněného dokumentu [26], který poskytuje rámec pro stanovení nejistoty a zároveň dodává že „nemůže nahradit kritické myšlení, intelektuální upřímnost, poctivost a profesní dovednost“.

Teoretický úvod do nejistot

Žádné měření není naprosto přesné, jelikož vždy působí náhodné vlivy a nebo jsou použity nedokonalé korekce výsledku. Jedná se tedy o pouhý odhad hodnoty měřené veličiny a je nutné vyjádřit nejistotu. Zdrojem těchto nejistot může být mimo jiné:

- Neúplné nebo nedokonalé definování měřené veličiny
- Nereprezentativní vzorkování
- Nedostatečná znalost vlivů podmínek okolního prostředí
- Osobní jednostrannost správnosti odečítání na analogových přístrojích
- Konečné rozlišení přístroje nebo prahová citlivost
- Nepřesné hodnoty etalonů měření
- Nepřesné hodnoty konstant a parametrů
- Aproximace
- Kolísání v opakovaných pozorováních

Složky nejistoty se dělí do dvou kategorií a to typ A a typ B, to slouží pro rozdělení postupu vyhodnocení. Obě hodnocení jsou postavené na rozdělení pravděpodobnosti a obě složky nejistoty jsou klasifikovány rozptyly nebo směrodatnými odchylkami.

Typ A

U standardní nejistoty typu A se odhadnutý rozptyl u^2 vypočítává z řady opakovaných pozorování neboli ze známého statistického odhadu rozptylu s^2 .

¹GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření

²BIPM – *Bureau International des Poids et Mesures* – Mezinárodní úřad pro míry a váhy

Většinou je nejlepší dostupný odhad hodnoty náhodné veličiny q , pro kterou bylo provedeno n nezávislých pozorování q_k , aritmetický průměr \bar{q} .

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n q_k \quad (5.1)$$

Odhad rozptylu σ^2 rozdělení pravděpodobnosti q se vypočítá podle rovnice:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (5.2)$$

Z tohoto odhadu rozptylu se vyjádří výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty $s(\bar{q})$ podle:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (5.3)$$

$$s(\bar{q}) = \sqrt{s^2(q_k)} \quad (5.4)$$

Standardní nejistota typu A je pak rovna této výběrové směrodatné odchylce střední hodnoty.

$$u_A = s(\bar{q}) \quad (5.5)$$

Typ B

U standardní nejistoty typu B se odhadnutý rozptyl u^2 vyhodnocuje pomocí dostupných znalostí, odborným úsudkem, dřívějších měřených dat, specifikací výrobce nebo poskytnutými daty při kalibraci.

Uvedená nejistota se určuje v intervalu, která 90 %, 95 % nebo 99 % konfidenční úroveň a předpokládá se, že bylo použito normální rozdělení.

U digitálních přístrojů je jeden ze zdrojů nejistoty rozlišovací schopnost indikační jednotky. Jestli rozlišovací schopnost indikační jednotky je δx , pak hodnota X může ležet v intervalu $X - \delta x/2$ až $X + \delta x/2$ se stejnou pravděpodobností. Rozptyl u^2 pak může být popsán pravoúhlým rozdělením pravděpodobnosti jako:

$$u^2 = \frac{(\delta x)^2}{12} \quad (5.6)$$

Což znamená, že standardní nejistota je:

$$u = 0,29 \cdot \delta x \quad (5.7)$$

Stejnou hodnotu lze získat i při uvažování hystereze. Kdy rozsah možných čtení z důvodu hystereze lze opět vyjádřit jako δx nebo z omezené přesnosti aritmetiky, kdy zaokrouhlení při automatické redukci dat pomocí počítače způsobí, že nejmenší změna výstupní veličiny, která může být získána je vyjádřena jako δx . V obou případech je vyjádření pomocí stejné standardní nejistoty jako v 5.7.

Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota u_c je kladná hodnota druhé odmocniny kombinovaného rozptylu u_C^2 , který je získán z:

$$u_C^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (5.8)$$

Kde:

- f – funkce daná rovnicí
- každá $u(x)$ – standardní nejistota vyhodnocená způsobem A nebo B

Koeficienty $\partial f / \partial x_i$ můžou být určovány i experimentálně mírou změny Y vyvolané změnami jednotlivých X_i zatímco zbývající vstupní veličiny se udržují konstantní.

Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota U se získá násobením kombinované standardní nejistoty u_C koeficientem rozšíření k , který se obvykle pohybuje v rozsahu 2 až 3, podle tzv. požadované konfidenční úrovně:

$$U = k \cdot u_c \quad (5.9)$$

Výsledek je pak vhodným způsobem vyjádřen jako $Y = y \pm U$,

6 Dokumenty související s měřením teploty

V této kapitole je popsáno velké množství dokumentů souvisejících s měřením teploty. Pro tento výpis je použito řazení, které by mělo odrážet pravděpodobnost a četnost použití, jelikož je tato práce určena především lidem hledajícím všeobecný přehled a nikoli odborným pracovníkům výrobních firem. Nicméně jsou zmíněny i dokumenty týkající se výhradně výrobců, zkušeben nebo jiných velmi odborných pracovišť. Tento výčet norem, nařízení, zákonů, standardů apod. je velmi obsáhlý a tak jsou jednotlivé dokumenty zevrubně popsány, abychom měli přehled, co se v nich nachází a popřípadě si našli celé znění. Normy a další dokumenty lze obvykle získat následujícími způsoby:

- **Národní normalizační orgány** – Normy vydávané v rámci jednotlivých zemí můžete získat přímo od národního normalizačního orgánu dané země. Například pro Českou republiku je to Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví¹, který provádí vydávání českých norem.
- **Mezinárodní organizace pro normalizaci** – Mnoho norem je vydáváno mezinárodními organizacemi, jako je Mezinárodní organizace pro normalizaci² (ISO³), Evropský výbor pro normalizaci⁴ (CEN⁵) nebo Mezinárodní elektrotechnická komise⁶ (IEC). Tyto organizace poskytují přístup ke svým normám prostřednictvím svých webových stránek a nabízejí možnost zakoupení nebo stáhnutí norem ve formátu PDF.
- **Specializované webové platformy** – Existují také specializované webové platformy, které nabízejí přístup ke knihovnám norem. Tyto platformy mohou být placené a poskytují širokou škálu norem z různých oblastí. Mezi nejnámější platformy patří Americký standardizační institut⁷ (ANSI), Britské normy online⁸ (BSOL⁹), Německý ústav pro průmyslovou normalizaci¹⁰ (DIN).
- **Další organizace** – Mezi další subjekty zabývající se předpisy kolem teplotních senzorů můžeme zařadit například certifikační organizaci Underwriters Laboratories¹¹ (UL LLC¹², Americkou společnost pro testování a materiály¹³ (ASTM¹⁴ nebo Evropskou organizaci pro zkušebnictví¹⁵ (EA¹⁶).

¹<https://www.unmz.cz/>

²<https://www.iso.org/home.html>

³ISO – *International Organization for Standardization* – Mezinárodní organizace pro normalizaci

⁴<https://www.cenelec.eu>

⁵CEN – *Comité Européen de Normalisation* – Evropský výbor pro normalizaci

⁶<https://iec.ch/homepage>

⁷<https://ansi.org>

⁸<https://bsol.bsigroup.com>

⁹BSOL – *British Standards Online* – Britské normy online

¹⁰<https://www.din.de/de>

¹¹<https://www.ul.com/>

¹²UL – *Underwriters Laboratories Limited Liability Company* – Underwriters Laboratories s.r.o.

¹³www.astm.org

¹⁴ASTM – *American Society for Testing and Materials* – Americká společnost pro testování a materiály

¹⁵<https://european-accreditation.org/>

¹⁶EA – *European co-operation for Accreditation* – Evropská organizace pro zkušebnictví

- **Zákony a nařízení vlády** – V některých případech je potřeba se pro výrobu, zavádění na trh nebo práci s teplotními senzory zaměřit i na zákony a nařízení vlády. Pro obojí doporučuji internetovou stránku *Zákony pro lidi*¹⁷.
- **Knihovny a univerzity:** V některých případech je možno získat přístup k normám prostřednictvím akademických knihoven nebo univerzitních databází. Tyto instituce často mají předplatné na normy a umožňují studentům, výzkumníkům a zaměstnancům přístup k jejich sbírkám.

Je důležité poznamenat, že normy mohou být placené a cena se může lišit v závislosti na zemi, organizaci a konkrétní normě. Mnoho norem je však k dispozici ve formě souborů PDF, které mohou být zakoupeny on-line a stáhnuté do počítače nebo jiného zařízení.

ČSN EN 13190:2003 – Číselníkové teploměry – Požadavky a zkoušení teploměrů, které využívají změn tlaku plynu, roztažnosti kapalin a bimetalického pásu.

ASTM E2877-12:2019 – *Standard Guide for Digital Contact Thermometers* – Průvodce digitálními kontaktními teploměry pro měření v laboratořích a průmyslu. (Anglicky)

ČSN EN 60751:2014 – Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory – Platnost do 03/2025.

ASTM E1137 R20:2008 – *Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers* – Specifikace platinových odporových senzorů. (Anglicky)

ČSN EN 60584-1 ED.2:2014 – Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance (Anglicky)

ČSN EN 12470-1+A1:2010 – Lékařské teploměry - Část 1: Skleněné teploměry s kapalnou kovovou náplní s maximálním zařízením

ČSN EN IEC 61784-1 ED.5:2019 – Průmyslové komunikační sítě - Profily - Část 1: Profily sběrnice pole (Anglicky)

ČSN ISO 18434-1:2009 – Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy.

Nařízení vlády č. 194/2022 Sb. – Nařízení vlády o požadavcích na odbornou způsobilost k výkonu činnosti na elektrických zařízeních a na odbornou způsobilost v elektrotechnice – Pravděpodobně první vyhláška se kterou se každý student setkává před prací ve studijních laboratořích. Následuje školení BOZP, které zahrnuje velké množství zákonů, které zde ale není uvedeno.

ASTM E230/E230M:2017 – *Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples* – Standardní specifikace pro termočlánky. (Anglicky)

Zákon č. 22/1997 Sb. – Zákon o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů – O tento zákon se opírají české normy a zkušebnictví a jsou zde i vypsány možné přestupky a pokuty.

Zákon č. 526/2020 Sb. – Zákon, kterým se mění zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů – Upravuje především poplatky za přístup k normám.

ČSN EN 60730-1 ED.3:2012 – Automatická elektrická řídicí zařízení pro domácnost a podobné účely - Část 1: Obecné požadavky.

ČSN EN IEC 60730-2-9 ED.4 + A1:2020 – Automatická elektrická řídicí zařízení pro domácnost a podobné účely - Část 2-9: Zvláštní požadavky na řídicí zařízení pro snímání teploty.

¹⁷<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-120>

ČSN EN 60529:1993 – Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód)

EA-4/02 M:2022 – Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci – Konkrétně se jedná o doporučený postup pro stanovení nejistoty měření, který je aplikovatelný na všechny typy měření a zahrnuje všechny zdroje nejistoty. Tento dokument je vydáván jako součást série dokumentů, které mají za cíl harmonizovat postupy pro akreditaci laboratoří a kalibračních zařízení v rámci Evropské unie.

ČSN EN ISO 10012:2003 – Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení.

ČSN EN 61010-1 ED.2:2011 – Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení - Část 1: Všeobecné požadavky.

ČSN EN 61326-1 ED.2:2013 – Elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení - Požadavky na EMC - Část 1: Obecné požadavky. – Účinnost do 06/2024.

ČSN EN IEC 61000-6-2 ED.4:2019 – Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-2: Kmenové normy - Odolnost pro průmyslové prostředí.

ASTM E644-11:2019 – *Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers* – Standardní testovací metody pro testování odporových teploměrů. (Anglicky)

ČSN EN 61557-1 ED.2:2007 – Elektrická bezpečnost v nízkonapětových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V - Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany - Část 1: Všeobecné požadavky – Tato norma se může vztahovat na teplotní senzory s elektrickým výstupem, které jsou součástí elektrických měřicích přístrojů. Její účinnost je do 11/2024.

ČSN EN ISO/IEC 17025 – Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří

ČSN EN 61508-1 ED.2:2011 – Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/-programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností - Část 1: Všeobecné požadavky

ČSN EN IEC 62443-4-1:2018 – Bezpečnost pro systémy průmyslové automatizace a řízení - Část 4-1: Požadavky na životní cyklus vývoje bezpečného výrobku (Anglicky)

ČSN EN IEC 61010-2-081 ED.3:2020 – Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení - Část 2-081: Zvláštní požadavky na automatická a poloautomatická zařízení pro analýzu a jiné účely.

UL 61010-1 3rd Edition:2012 – *UL Standard for Safety Electrical Equipment For Measurement, Control, and Laboratory Use; Part 1: General Requirements* – Norma, která specifikuje bezpečnostní požadavky pro elektrická zařízení pro měření, řízení a laboratorní použití, včetně teplotních senzorů. (Anglicky)

Nařízení vlády č. 117/2016 Sb. – Nařízení vlády o posuzování shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při jejich dodávání na trh. – Týká se jakéhokoliv přístroje kromě výjimek uvedených v tomto nařízení, které mohou být zdrojem elektromagnetického rušení.

Nařízení vlády č. 118/2016 Sb. – Nařízení vlády o posuzování shody elektrických zařízení určených pro používání v určitých mezích napětí při jejich dodávání na trh. – Týká se elektrických zařízení v rozsahu napětí pro střídavý proud od 50 V do 1000 V a pro stejnosměrný proud od 75 V do 1500 V.

7 Vlastní závěr

Tato práce přináší ucelený pohled na procesní měření teploty v průmyslové praxi. Na základě detailního zkoumání klíčových pojmů, charakteristik a vlastností snímačů teploty, měřicího řetězce, druhů snímačů teploty, soupisu norem a bezdrátové komunikace, nabízí tato publikace mnoho přínosů pro čtenáře.

Prvním přínosem je získání základních znalostí a porozumění důležitým termínům, technologiím a principům, které se týkají měření teploty v průmyslovém prostředí. Tato znalost je klíčová pro správnou volbu a implementaci měřicích systémů, které přesně a spolehlivě měří teplotu.

Druhým přínosem je detailní analýza charakteristik a vlastností snímačů teploty. Porozumění různým typům snímačů, jejich výhodám a omezením umožňuje čtenářům vybrat nejvhodnější technologii pro jejich konkrétní aplikace. To zlepšuje přesnost měření a kvalitu dat získaných z měření teploty.

Práce rovněž nabízí hodnotný pohled na měřicí řetězec a jeho jednotlivé komponenty. Získání hlubšího povědomí o funkci a významu každého prvku v měřicím řetězci poskytuje čtenářům náhled na celkový proces měření teploty a umožňuje jim efektivněji provádět diagnostiku a údržbu systémů.

Dalším přínosem je přehled různých druhů snímačů teploty. Díky důkladnému výčtu a analýze technologií, jako jsou termočlánky, odporové teploměry, termistory a infračervené senzory, čtenáři získávají ucelený obraz o možnostech, které jsou jim k dispozici při výběru snímače teploty pro jejich specifické potřeby.

Dalším přínosem této publikace je soupis norem. Znalost relevantních norem a standardů v oblasti procesního měření teploty je důležitá pro zajištění shody a spolehlivosti měření. Čtenáři jsou seznámeni s klíčovými normami a mohou je využít pro navrhování, provoz a údržbu svých měřicích systémů.

Nakonec, publikace přináší přehled o bezdrátové komunikaci v kontextu procesního měření teploty. Tento moderní trend nabízí čtenářům nové možnosti v oblasti instalace, monitorování a ovládání měřicích systémů. Získání znalostí o bezdrátových komunikačních protokolech jim umožňuje využít těchto výhod a efektivněji řídit své procesy. Z důvodu dynamického rozvoje bezdrátové komunikace a potřebnému množství znalostí z oboru programování zde nejsou uvedeny žádné praktické ukázky.

Celkově lze tedy konstatovat, že tato publikace přináší hodnotné informace, které čtenáři umožňují lépe porozumět, vybrat a implementovat procesní měřicí systémy teploty v průmyslové praxi. Přínosem je zlepšení přesnosti měření, zvýšení bezpečnosti, optimalizace procesů a dosažení vyšší kvality výrobků.

Na druhou stranu je vzhledem k velkému množství možností na trhu popis jednotlivých snímačů pouze obecného charakteru. Při výběru tak bude nutné prohledat velké množství katalogových listů výrobků pro nalezení vhodného snímače.

Také kapitola o nejistotách měření je velmi obecná a představuje jen úvod do této problematiky. V praxi je to jistě postačující, málo kdo při sledování teploty by sám určoval nejistoty měření, ale z akademického a laboratorního pohledu je to velmi důležité a je potřeba tomu věnovat velkou pozornost.

8 Závěr

V této práci je podán komplexní přehled o procesním měření teploty v průmyslové praxi. Je zaměřena na klíčové aspekty, které je třeba zohlednit při výběru teplotního senzoru pro konkrétní aplikaci procesního měření teploty v průmyslové praxi. Přináší přehled o různých typech senzorů a jejich charakteristikách, a tím nám pomáhá lépe porozumět jejich výhodám a nevýhodám.

Jedním z důležitých zjištění je, že neexistuje univerzální nejpoužívanější teplotní senzor. Výběr senzoru závisí na konkrétní aplikaci a potřebách uživatele. Například RTD senzory jsou často preferovány v průmyslových aplikacích díky své přesnosti a stabilitě. Naopak digitální teploměry se často využívají v lékařských aplikacích pro svou jednoduchou obsluhu a hygienické provedení. Pro měření vysokých teplot se zase často volí termočlánky, které jsou schopny odolávat extrémním teplotám.

Při výběru senzoru je třeba zohlednit několik kritérií, jako je přesnost měření, rychlost odezvy, rozsah teplot, spolehlivost a cena. Je důležité vybrat senzor, který nejlépe vyhovuje potřebám aplikace a zajistí přesné a spolehlivé měření.

Práce tedy přináší důležité informace, které nám umožňují provést informované rozhodnutí při výběru teplotního senzoru pro konkrétní aplikaci. Tím se zvyšuje kvalita měření, optimalizuje se výkon procesů a zajišťuje se efektivní a spolehlivé monitorování teploty v průmyslovém prostředí.

Prakticky jakákoliv část z této práce lze dále rozšířit o podrobnější informace. Nicméně pro praxi by z mého pohledu bylo vhodné pokračovat v posouzení i ekonomické stránky implementace různých druhů snímačů například v závislosti na přesnosti měření, či podrobnějším popisu potřebných komponent pro sestavení sítě snímačů na bedrech bezdrátové komunikace a ukázat výhody možnosti propojení snímačů více fyzikálních veličin než pouze teploty. Informace o tlaku, vlhkosti, hustoty nebo složení látek by mohlo znatelně zvýšit přesnost a spolehlivost měření.

9 Seznam použitých zkratek

ANSI	American National Standards Institute	Americký standardizační institut
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures	Mezinárodní organizace pro metrologii
BSOL	British Standards Online	Britské normy online
CEN	Comité Européen de Normalisation	Evropský výbor pro normalizaci
DIN	Deutsches Institut für Normung	Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
EA	European co-operation for Accreditation	Evropská spolupráce pro akreditaci
ENOB	Effective Number Of Bits	Efektivní šumové číslo
FBG	Fiber Bragg Grating	Optická vláknová mřížka
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement	Příručka pro vyjádření nejistot v měření
HART	Highway Addressable Remote Transducer	Adresovatelný dálkový převodník
IEC	International Electrotechnical Commission	Mezinárodní elektrotechnická komise
IoT	Internet of Things	Internet věcí
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
LED	Light-Emitting Diode	Elektroluminiscenční dioda
MSX	Multi-Spectral dynamic imaging	Multispektrální zobrazení
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	Úzkopásmový internet věcí
NEP	Noise Equivalent Power	Výkonový ekvivalent

NTC	Negative Temperature Coefficient	Záporný teplotní koeficient
PDF	Portable Document Format	Přenosný formát dokumentů
PTC	Positive Temperature Coefficient	Kladný teplotní koeficient
RMS	Root Mean Square noise	Střední kvadratická hodnota šumu
SI	Le système International d'Unités	Mezinárodní systém jednotek
SNR	Signal To Noise ratio	Poměr signál-šum
TDMA	Time Division Multiplex Acces	Řízení přístupu časovým multiplexem
THD	Total Harmonic Distortion	Celkové harmonické zkreslení
UV	Ultraviolet	Ultrafialové záření
WGM	Whispering Gallery Mode	Druh vlny, která může cestovat kolem konkávního povrchu
WIA-PA	Wireless networks for Industrial Automation - Porcess Automation	Bezdrátová síť pro průmyslovou automatizaci

Seznam obrázků

1.1	Srovnání stupnic pro měření teploty [4]	15
2.1	Schéma měřicího řetězce	18
2.2	Obecné schéma možné struktury inteligentního snímače	19
2.3	Blokové schéma vnitřku obvodu LM83 [28]	19
2.4	Nelinearita při číslicovém zpracování signálu [12]	22
3.1	Schéma rozdělení měřících prostředků použitého v této práci	26
3.2	Statické charakteristiky termočlánků [18]	30
3.3	Velikost chyby při změně emisivity o 1 % v závislosti na teplotě povrchu a spektrálním rozsahu měřicího přístroje [25]	34
3.4	Zorné pole IR teploměru [22]	35
3.5	Akustický snímač teploty s ultrazvukovou detekcí [15]	37
4.1	Komunikační síť WirelessHART [30]	43
4.2	Technologie založené na IoT [7]	45
4.3	Schéma komunikace pomocí Sigfox [6]	46

Literatura

- [1] *RF Wireless world: NB IoT tutorial-features, Spectrum, applications of NB IoT*. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/NB-IoT-tutorial.html>.
- [2] *Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877* [online]. Redakce HW serveru, 20.. květen 2000 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>.
- [3] *HART Communication protocol: IEC 62591 WirelessHART, System Engineering Guide*. 5.. květen 2013. Dostupné z: https://www.fieldcommgroup.org/sites/default/files/imce_files/technology/documents/WirelessHART_system_eng_guide.pdf.
- [4] *IoT Port: LoRaWAN, Sigfox nebo NB-IoT?* 10.. března 2020. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/iot-novinky/lorawan/lorawan-sigfox-nebo-nb-iot-srovnani-3-vyznamnych-typu-iot-siti>.
- [5] *Highway Addressable Remote Transducer Protocol* [online]. Wikipedia, the free encyclopedia, 25.. květen 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Highway_Addressable_Remote_Transducer_Protocol.
- [6] *Sigfox: oG technology by UNABIZ*. 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.sigfox.com/>.
- [7] BERNADOU, B. B. *What is Cellular IoT* [online]. freeway, 2.. prosinec 2022 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.freeway.com/what-is-cellular-iot-internet-of-things/>.
- [8] BLAŽEK, J. *ZÁKLADNÍ INFORMACE O PRŮMYSLOVÉ SBĚRNICI PROFIBUS: ČÁST 1* [online]. 22.. září 2010 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.blaja.cz/archiv-clanku/zakladni-informace-o-prumyslove-sbernici-profibus-cast-1.html>.
- [9] *Bluetooth: Mesh Networking*. Bluetooth SIG, Inc., 2023 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/feature-enhancements/mesh/>.
- [10] CAMPBELL, S. *BASICS OF THE SPI COMMUNICATION PROTOCOL* [online]. [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol/>.
- [11] *ČSN IEC 751: Průmyslové platinové odporové snímače teploty*. Červenec 1994.
- [12] ĎAĎO, S. a KREIDL, M. *Senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [13] *DIN 43760: Measurement and control; electrical temperature sensors; reference-tables for nickel resistors for resistance thermometers*. 1987. vyd. Deutsches Institut für Normung E.V., 1987.

- [14] FOSTER, L. D. IoT Protocols you need to know: ISA100.11a. leden 2022, [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.cbttuggets.com/blog/technology/networking/iot-protocols-you-need-to-know-isa100-11a>.
- [15] FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Design, and Applications*. 5. vyd. Springer International Publishing Switzerland, 2016. ISBN 978-3-319-19302-1.
- [16] HALLIDAY, D., WALKER, J. a RESNICK, R. *Fyzika*. 1. vyd. Vutium, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [17] HYNČICA, O., KACZ, P., BRADÁČ, Z. a FIEDLER, P. ZigBee v praxi: první zkušenosti s novou bezdrátovou technikou. *Automa* [online]. 1. Ústí nad Labem: FCC Public s. r. o. prosinec 2005, sv. 11, č. 12, [cit. 2023-04-19]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/zigbee-v-praxi-prvni-zkusenosti-s-novou-bezdratovou-technikou-2005_12_30819_721/.
- [18] KADLEC, K. *Měření teploty*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 21.. únor 2009 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/predn/txt-mgr/3-fpbt09-teplota.pdf>.
- [19] KMÍNEK, M. *Technická měření: Měření teploty*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>.
- [20] *LoRa Alliance: What is LoRaWAN*. LoRa Alliance, 2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>.
- [21] *Microchip: Signal Chain Design Guide*. Chandler: Microchip Technology Inc., 2009.
- [22] NOVÁK, M. *Technická měření*. 1. vyd. České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [23] PARIKH, B. *CAN protocol: Understanding the controller area network* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.engineersgarage.com/can-protocol-understanding-the-controller-area-network-protocol/>.
- [24] *Slovník současné češtiny*. Lingea s.r.o., 2018 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.nechybujte.cz/>.
- [25] SOVA, J. a KOVÁŘ, J. Termokamery a pyrometry. *Automa* [online]. 1. Ústí nad Labem: FCC Public s. r. o. únor 2014, sv. 20, č. 2, [cit. 2023-04-02]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52891.pdf.
- [26] SUCHÁNEK, M. a SKOPAL, J. *Pokyn pro vyjadřování nejistot měření (GUM)*. Praha 2: Q-art, Praha, 2012. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>.
- [27] TERMOKAMERY.CZ. *Funkce termokamery*. 2013 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/funkce-termokamery/>.
- [28] VOJÁČEK, A. Inteligentní senzory teploty různých výrobců. [online]. září 2005, [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005090901>.

- [29] VOJÁČEK, A. *Základní informace o RS-485 a RS-422 pro každého* [online]. 14. červenec 2007 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/zakladni-informace-o-rs-485-rs-422-pro-kazdeho>.
- [30] VOJÁČEK, A. Bezdrátová průmyslová komunikace WirelessHART. [online]. listopad 2022, [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezdratova-prumyslova-komunikace-wirelesshart-uvod.html>.
- [31] WEDD, M. IoT for all: What Is Cellular IoT? únor 2020. Dostupné z: <https://www.iotforall.com/what-is-cellular-iot>.
- [32] *Zákon č.505/1990 Sb.: o metrologii, ve znění pozdějších předpisů*. Listopad 1990.
- [33] ZHENG, M., LIANG, W., YU, H. a XIAO, Y. Performance Analysis of the Industrial Wireless Networks: Standard: WIA-PA. únor 2017. DOI: 10.1007/s11036-015-0647-7. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283933632_Performance_Analysis_of_the_Industrial_Wireless_Networks_Standard_WIA-PA.
- [34] ŘEHÁK, J. *Co je to WiFi: úvod do technologie*. Redakce HW serveru, 21.. červen 2003 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/produkty/ethernet/co-je-to-wifi-uvod-do-technologie.html>.
- [35] ŠIMÍČEK, V. a DRÁPALOVÁ, J. *Spojovací technika*. Code Creator, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-88058-14-4.