

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Senzorový systém pro testování úrovně tepelné ochrany
pracovních rukavic**

Originál zadání DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá vývojem vícekanálového systému pro sběr a zpracování dat. Úvod práce je zaměřen na stručný soupis obecných metod pro dotykové a bezdotykové měření teploty. V další části jsou vybrány a popsány vhodné senzory teploty a koncept zpracování dat. Praktická část je zaměřena na návrh, realizaci a charakterizaci sensorového systému pro testování úrovně tepelné ochrany pracovních rukavic a vizualizaci na 3D modelu.

Klíčová slova

Měření teploty, sensorový systém, 3D vizualizace

Abstract

This thesis deals with the development of multiplexer system intended for data collection and data processing. The beginning of the thesis is focused on a brief description of the basic methods for contacted and uncontacted temperature measurement. The middle part presents and describes selected temperature sensors and concept of data processing. The practical part is focused on the design, realization and characterization of the sensor system used for testing thermal protection level of work gloves and also 3D visualization.

Key words

Temperature measurement, sensor system, 3D visualization

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 15.5.2017

David Kalaš

.....

Podpis

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 REŠERŠE V OBLASTI TEPLOTNÍCH SENZORŮ	10
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY	10
1.2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ TEPLoty	10
1.3 DOTYKOVÉ SENZORY TEPLoty	12
1.3.1 <i>Odporové kovové senzory</i>	12
1.3.2 <i>Odporové polovodičové senzory</i>	13
1.3.3 <i>Polovodičové senzory s PN přechodem</i>	15
1.3.4 <i>Termoelektrické senzory</i>	18
1.4 BEZDOTYKOVÉ SENZORY TEPLoty	19
1.4.1 <i>Kvantové senzory</i>	19
1.4.2 <i>Tepelné senzory</i>	20
2 VYBRANÉ SENZORY TEPLoty	21
2.1 DS18B20 OD MAXIM INTEGRATED	21
2.2 TMP107 OD TEXAS INSTRUMENTS	23
2.3 TMP05 OD ANALOG DEVICES	25
3 REALIZACE SENZOROVÉHO SYSTÉMU	27
3.1 HARDWARE	27
3.1.1 <i>Mikroprocesor</i>	27
3.1.2 <i>Model lidské ruky</i>	28
3.1.3 <i>Realizace senzorového pole</i>	30
3.2 SOFTWARE	32
3.2.1 <i>Vícekanálové měření teploty</i>	32
3.2.2 <i>Zpracování a vizualizace naměřených dat</i>	32
4 CHARAKTERIZACE SENZOROVÉHO SYSTÉMU	37
4.1 KALIBRACE SENZORŮ TEPLoty	39
4.2 DYNAMICKÁ ODEZVA SENZORŮ TEPLoty	42
ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A - MIKROPROCESOR STM32F446RE	1
PŘÍLOHA B – MODEL LIDSKÉ RUKY A ROZMÍSTĚNÍ SENZORŮ	3
PŘÍLOHA C – ZALÉVACÍ HMOTY	5
PŘÍLOHA D – NÁVRH FLEXIBILNÍCH PLOŠNÝCH SPOJŮ	7
PŘÍLOHA E – NASTAVENÍ INPUT CAPTURE KANÁLU A VÝPOČET TEPLoty	10

Seznam obrázků a tabulek

OBR. 1.1: ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SENZORŮ TEPLoty PODLE STYKU S MĚŘENÝM PROSTŘEDÍM A FYZIKÁLNÍHO PRINCIPU	11
OBR. 1.2: ROZDĚLENÍ SENZORŮ TEPLoty DLE TYPY VÝSTUPU	11
OBR. 1.3: ZÁVISLOST ODPOROVÝCH KOVOVÝCH SENZORŮ NA TEPLotĚ	13
OBR. 1.4: ZÁVISLOST ODPORU TERMISTORU NA TEPLotĚ	15
OBR. 1.5: ZÁVISLOST NAPĚTÍ DIODY V PROPUSTNÉM SMĚRU NA TEPLotĚ	16
OBR. 1.6: INTEGROVANÝ PN SENZOR TEPLoty S TRANZISTORY [6]	16
OBR. 1.7: PRINCIP TERMOČLÁNKU [6]	18
OBR. 1.8: ZÁVISLOST NAPĚTÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ TERMOČLÁNKŮ NA TEPLotĚ	19
OBR. 1.9: V-A CHARAKTERISTIKA FOTODIODY [9]	20
OBR. 2.1: ČASOVÁNÍ NA 1-WIRE SBĚRNICI [10]	22
OBR. 2.2: ADRESOVACÍ A PŘÍKAZOVÉ OPERACE NA SMAART WIRE SBĚRNICI	23
OBR. 2.3: TYPICKÉ ZAPOJENÍ TMP107 [12]	24
OBR. 2.4: DAISY CHAIN ZAPOJENÍ TMP05 [14]	25
OBR. 2.5: ŘAZENÍ PWM VÝSTUPŮ JEDNOTLIVÝCH SENZORŮ TMP05 [14]	26
OBR. 3.1: MODEL LIDSKÉ RUKY VYROBENÝ POMOCÍ 3D TISKU	28
OBR. 3.2: CYKLUS OSAZOVÁNÍ A ZALITÍ MODELU PRSTU	31
OBR. 3.3: BLOKOVÉ SCHÉMA STAVŮ A PŘECHODŮ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ PROGRAMU	33
OBR. 3.4: SOFTWARE PRO ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACI DAT - ZÁLOŽKA MĚŘENÍ	34
OBR. 3.5: SOFTWARE PRO ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACI DAT - ZÁLOŽKA VIZUALIZACE	35
OBR. 3.6: SOFTWARE PRO ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACI DAT - ZÁLOŽKA ANALÝZA	36
OBR. 4.1: VÝSTUPNÍ PWM SIGNÁL SENZORU TMP05	37
OBR. 4.2: NÁBĚŽNÁ HRANA VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU SENZORU TMP05	37
OBR. 4.3: KALIBRACE OFFSETU PŘI JMENOVITÉ TEPLotĚ 25 °C	40
OBR. 4.4: KALIBRAČNÍ SCHODOVITÝ PROFIL PRO MĚŘENÍ PŘESNOSTI TMP05 PŘI TEPLotĚ 10 AŽ 90 °C	41
OBR. 4.5: PŘESNOST SENZORŮ TMP05 PŘI SCHODOVITÉM PROFILU S TEPLotOU OD 10 DO 90 °C	41
OBR. 4.6: DEGRADACE SILIKONOVÝCH ZALÉVACÍCH HMOT PO CYKlickÉM MĚŘENÍ V TERMOSTATICKÉ OLEJOVÉ LÁZNI	42
OBR. 4.7: POROVNÁNÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ PRO JEDNOTLIVÉ ZALÉVACÍ HMOTY PŘI SKOKOVÉ ZMĚNĚ TEPLoty Z 25 NA 80 °C A ZPĚT	43
OBR. 4.8: POROVNÁNÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ PRO POLYURETANOVOU HMOTU PŘI RŮZNÉM UMÍSTĚNÍ SENZORŮ A SKOKOVÉ ZMĚNĚ TEPLoty Z 25 NA 80 °C A ZPĚT	44
OBR. A.1: BLOKOVÉ SCHÉMA MIKROPROCESORU MCU STM32F446RE	1
OBR. A.2: POUZDRO MCU STM32F446RE - OBSAZENÍ PINŮ	2
OBR. B.1: KERAMICKÝ MODEL RUKY OD FIRMY CERAMTEC PRO VÝROBU GUMOVÝCH RUKAVIC	3
OBR. B.2: ROZMÍSTĚNÍ SENZORŮ TEPLoty	4
OBR. D.1: A) DESIGN PLOŠNÉHO SPOJE, B) OSAZENÉ ELEMENTY (VLEVO HŘBET, VPRAVO BOKY PRSU)	7
OBR. D.2: 3D MODEL VČETNĚ PLOŠNÉHO SPOJE	8
OBR. D.3: VÝPOČET CHARAKTERISTICKÉ IMPEDANCE SPOJE (SATURN PCB TOOLKIT)	8
TAB. 2.1: UNIKÁTNÍ 64-BITOVÉ REGISTRAČNÍ ČÍSLO	211
TAB. 3.1: ROZMÍSTĚNÍ SENZORŮ TEPLoty	299
TAB. 4.1: VZORKY ZALÉVACÍCH HMOT	388
TAB. 4.2: DYNAMICKÁ ODEZVA SENZORŮ PRO RŮZNÉ ZALÉVACÍ HMOTY PŘI SKOKOVÉ ZMĚNĚ TEPLoty Z 25 NA 80 °C A ZPĚT	444
TAB. 4.3: DYNAMICKÁ ODEZVA SENZORŮ PRO POLYURETANOVOU HMOTU PŘI RŮZNÉM UMÍSTĚNÍ SENZORŮ A SKOKOVÉ ZMĚNĚ TEPLoty Z 25 NA 80 °C A ZPĚT	445
TAB. C.1: VÝBĚR ZALÉVACÍCH HMOT	5

Seznam symbolů a zkratk

ADC	Analogově digitální převodník
B [K]	Tepelná konstanta termistoru
CRC	Cyklický redundantní součet
DAC	Digitálně analogový převodník
e [C]	Elementární náboj
E [lx]	Intenzita osvětlení
EEPROM	Elektronicky mazatelná paměť
FPU	Matematický koprocesor
GND	Zemní potenciál
I [A]	Elektrický proud
J [$A \cdot m^{-2}$]	Proudová hustota
K [$J \cdot K^{-1}$]	Boltzmanova konstanta
m	rekombinační koeficient polovodiče
NTC	Termistory se záporným součinitelem odporu
MCU	Mikrokontrolér
MSB	Bit s nejvyšší vahou
LSB	Bit s nejnižší vahou
PTC	Termistory s kladným součinitelem odporu
PWM	Pulzně šířková modulace
R [Ω]	Elektrický odpor
RISC	Architektura mikroprocesorů s redukovanou instrukční sadou
ROM	Elektronická paměť
$S_{A,B} [V \cdot K^{-1}]$	Seebeckovy koeficienty
$S_E [m^2]$	Plocha emitorového přechodu
S-H koeficient	Steinhart-Hartovi koeficienty
T [$^{\circ}C$]	Teplota
U [V]	Elektrické napětí
UART	Univerzální asynchronní přijímač/vysílač
USART	Univerzální synchronní/asynchronní přijímač/vysílač
USB	Univerzální sériová sběrnice
V_{DD}	Napájecí napětí
$\alpha [K^{-1}]$	Tepelný součinitel odporu
$\tau [s]$	Časová konstanta

Úvod

V posledních letech dochází k výraznému rozvoji v oblasti pracovních a ochranných oděvů. Tento fakt je způsoben využitím nových materiálů v těchto oděvech, vývojem technologií pro jejich výrobu, případně integrací jednoduchých senzorových prvků přímo do textilií. V souvislosti s tímto rozvojem je spojen požadavek na kvalitní testování tepelné odolnosti pracovních oděvů. V současné době je možné konstatovat, že systémy umožňující kvalitní tepelné testování jsou dostupné pouze na několika málo předních pracovištích v Evropě (nejblíže v EMPA St. Gallen ve Švýcarsku)". Nutno však podotknout, že například tento systém není vhodný pro testování pracovních rukavic vzhledem k omezenému počtu senzorů, především v oblasti ruky.

Tato diplomová práce je zaměřena na řešení a realizaci způsobu vícekanálového měření teploty pro testování tepelné odolnosti pracovních rukavic. Práce se zabývá popisem senzorů teploty a jejich charakterizací, dále pak praktickou realizací vyhovujícího senzorového pole a jeho vizualizací na počítačovém 3D modelu lidské ruky.

Navržený systém by měl sloužit především k odhalení kritických míst rukavice z pohledu tepelné odolnosti. Tepelnou odolnost pracovních rukavic ovlivňují materiály, které nejsou použity na celé ploše rukavic (např. výztuhy, pěnové výplně, reflexní a designové prvky apod.), technologie spojování (sešívání, lepení nebo svařování) a konstrukce rukavice (počty dílců, pozice spojů a vzájemná pozice jednotlivých vrstev).

Cílem této práce je vyhledat vhodné senzory teploty pro měření přibližně na dvou stovkách míst za jednotky stovek až jednotky tisíc milisekund, kalibrovat a otestovat realizovaný prototyp senzorového systému a na základě výsledků posoudit vhodnost navrženého systému. Naměřená data budou vyhodnocena a vizualizována pomocí programu na 3D modelu lidské ruky.

1 Rešerše v oblasti teplotních senzorů

1.1 Základní pojmy

Teplota [J] je fyzikální veličina charakterizující přenos vnitřní energie látky. Nejedná se o stavovou veličinu ani určitý druh energie, ale veličinu spojenou s termodynamickým procesem výměny tepla mezi dvěma látkami. Teplota je možné měřit pomocí přístroje, který se nazývá kalorimetr.

Teplota je termodynamická stavová veličina charakterizující tepelný stav hmoty. Tato veličina je definována na základě vratného Carnotova cyklu a lze ji kvantitativně vyjadřovat několika způsoby např. Kelvinova teplota [K], Celsiova teplota [$^{\circ}C$] a Fahrenheitova teplota [F].

Kelvinova teplotní stupnice je definována na základě trojného bodu vody, tj. jediného bodu, při kterém dochází k rovnovážnému stavu tří skupenství – ledu, vody a syté vodní páry. Tato rovnováha byla stanovena na 273,16 K. Druhým vztažným bodem je teplota 0 K, kdy ustává termický pohyb elementárních částic látky.

Celsiova teplotní stupnice odpovídá v měřítku Kelvinově stupnici, tzn. $1^{\circ}C = 1 K$. Celsiova teplotní stupnice je ovšem posunuta tak, aby teplota $0^{\circ}C$ korespondovala s rovnovážným stavem chemicky čisté vody a jejího ledu a teplota $100^{\circ}C$ odpovídala rovnovážnému stavu vody a její syté páry. Celsiova teplotní stupnice je definována vztahem:

$$t_c = T - 273,15 [^{\circ}C] \quad (1.1)$$

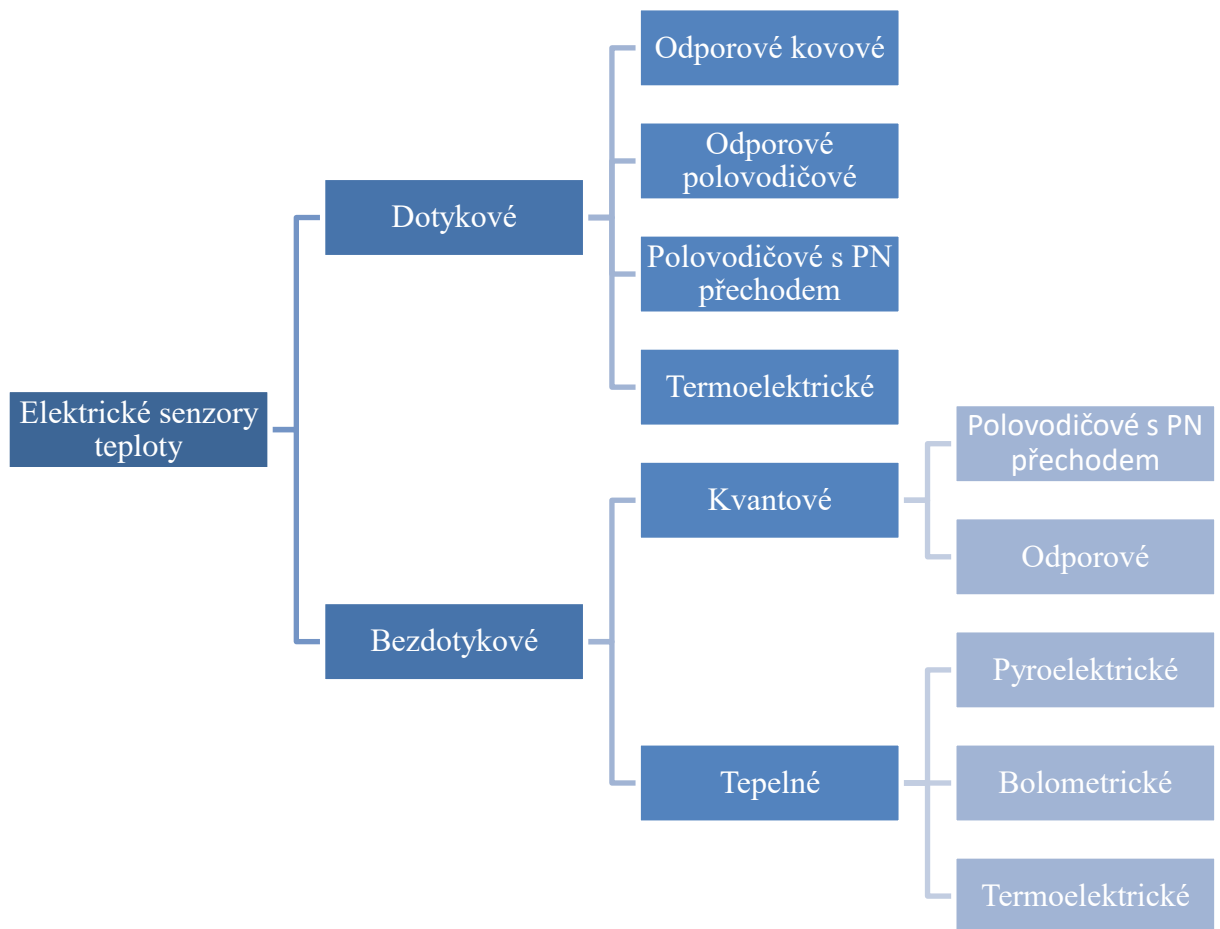
Fahrenheitova teplotní stupnice je již používána jen zřídka, a to v některých anglosaských zemích. Základní body teplotní stupnice jsou teplota zdravého lidského těla, která odpovídá $96^{\circ}F$, a tepelný stav směsi vody, ledu a chloridu amonného, který odpovídá $0^{\circ}F$. [1]

1.2 Rozdělení senzorů teploty

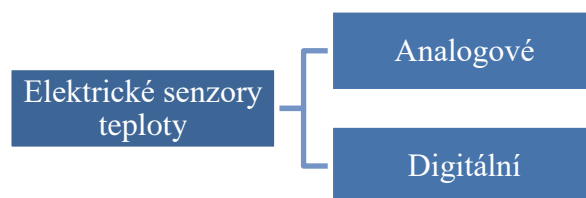
Jedním ze základních rozdělení senzorů teploty je klasifikace dle styku s měřeným prostředím, a to na dotykové a bezdotykové. Dále pokračujeme rozdělením dle fyzikálního principu (např. odporové, polovodičové, pyroelektrické atd.).

Další možný způsob klasifikace senzorů je dle typu výstupu. Digitální senzory teploty na rozdíl od analogových mohou disponovat určitým stupněm inteligence, tzn. na jediném čipu nalezneme senzor teploty (zpravidla využívající závislost napětí přechodu polovodičové

součástky na teplotě), analogově-digitální převodník a nezřídka kdy blok umožňující přenos informací a řízení po sběrnici apod.



Obr. 1.1: Základní rozdělení senzorů teploty podle styku s měřeným prostředím a fyzikálního principu



Obr. 1.2: Rozdělení senzorů teploty dle typu výstupu

1.3 Dotykové senzory teploty

1.3.1 Odporové kovové senzory

Odporové kovové senzory teploty pracují na jednoduchém principu závislosti odporu na teplotě. Se změnou teploty dochází ke změnám v krystalové mřížce kovu a elektrony se pohybují stále pomaleji, elektrický proud musí vynaložit větší sílu pro překonání daného odporu a na prvku se zvětšuje napětí. Dle smyslu změny odporu v závislosti na teplotě rozlišujeme odporové teplotní senzory s kladným (odpor roste společně s teplotou) a záporným (odpor se zvyšující se teplotou klesá) teplotním součinitelem. Závislost odporu na teplotě lze v rozsahu 0 – 100 °C přibližně linearizovat podle vzorce (1.2) [1] a [2].

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T) [\Omega] \quad (1.2)$$

kde R_0 je jmenovitý odpor při teplotě 0 °C

α je teplotní součinitel odporu závisující na použitém materiálu

ΔT je rozdíl teplot, tzn. $T - T_0 = T - 0$

K přesnému matematickému vyjádření závislosti odporu teplotního senzoru na teplotě používáme vyjádření pomocí koeficientů A, B a C (1.3).

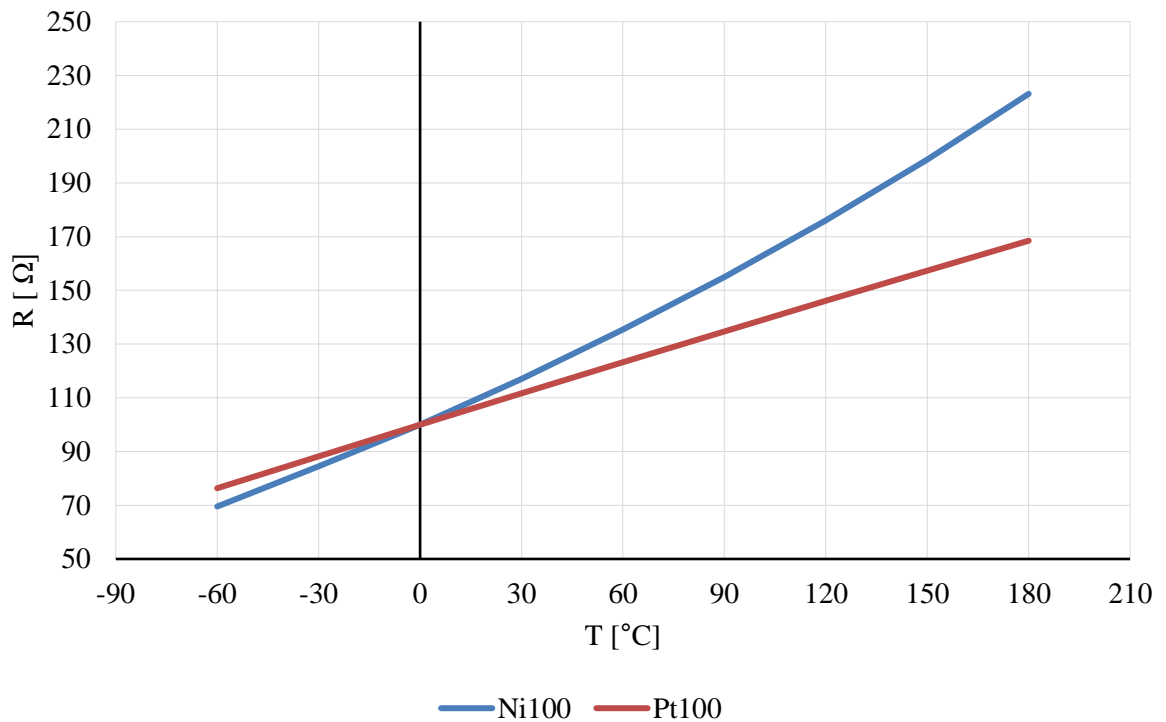
$$R_T = R_0 \cdot [A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 \cdot (T - 100)] [\Omega] \quad (1.3)$$

kde R_0 je jmenovitý odpor při teplotě 0 °C

T je teplota

A, B, C jsou koeficienty závisující na použitém materiálu

Hlavními požadavky na kovové senzory teploty jsou velká hodnota teplotního součinitele odporu pro přesnější rozlišení teploty, časová stabilita odporu a lineární závislost na teplotě. Nejpoužívanějším materiálem je platina pro svoji chemickou odolnost, časovou stabilitu, velký teplotní rozsah a prakticky lineární charakteristiku. Dále se můžeme setkat s odporovými senzory z niklu nebo mědi, ty se vyznačují vyšší hodnotou teplotního součinitele odporu, menší stabilitou a linearitou.



Obr. 1.3: Závislost odporových kovových senzorů na teplotě

1.3.2 Odporové polovodičové senzory

Odporové polovodičové senzory teploty využívají, stejně jako kovové odporové senzory, závislosti odporu na teplotě. Princip je však odlišný. K tomu, aby polovodič vedl elektrický proud, je nutné, aby elektron překonal tzv. zakázaný pás a dostal se z valenčního pásu do vodivostního pásu. K překonání zakázaného pásu je však nutná energie, kterou můžeme získat např. z elektromagnetického pole, světelného záření, nebo tepla. Mezi odporové polovodičové senzory teploty řadíme monokrystalické odporové senzory a termistory.

Monokrystalické senzory teploty mají kladný součinitel odporu a jejich fyzikální princip je podobný jako u kovů. Vyrábí se převážně z křemíku za použití nevlastního polovodiče typu N, tedy polovodiče s elektronovou vodivostí. V určitém rozsahu teplot jsou atomy příměsí polovodiče zcela ionizovány a počet děr a elektronů se již nemění, teplota tím pádem dále ovlivňuje pouze pohyblivost nosičů a odpor narůstá. Hlavní předností je poměrně vysoká hodnota součinitele odporu při zachování relativně lineární závislosti na teplotě. Závislost odporu křemíku na teplotě je dána vztahem (1.4) [5].

$$R_T = R_0(1 + a \cdot T + b \cdot T^2)[\Omega] \quad (1.4)$$

kde T je teplota

R_0 je jmenovitý odpor při teplotě 0°C

a, b jsou koeficienty polynomu, jejichž hodnoty závisí na koncentraci příměsi.

Termistory, stejně jako odporové kovové senzory, dělíme na senzory s kladným (PTC) a záporným (NTC) součinitelem odporu s tím rozdílem, že u termistorů se záporný teplotní součinitel odporu objevuje mnohem častěji. Hlavním rozdílem je však značně nelineární charakteristika, velká citlivost a široký rozsah odporu termistorů. Pro teplotní závislost termistorů platí přibližný vztah (1.5) [1], [3] a [4].

$$R_T = R_{25} e^{\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{298,15}\right)}[\Omega] \quad (1.5)$$

kde B je teplotní konstanta závislá na použitém materiálu

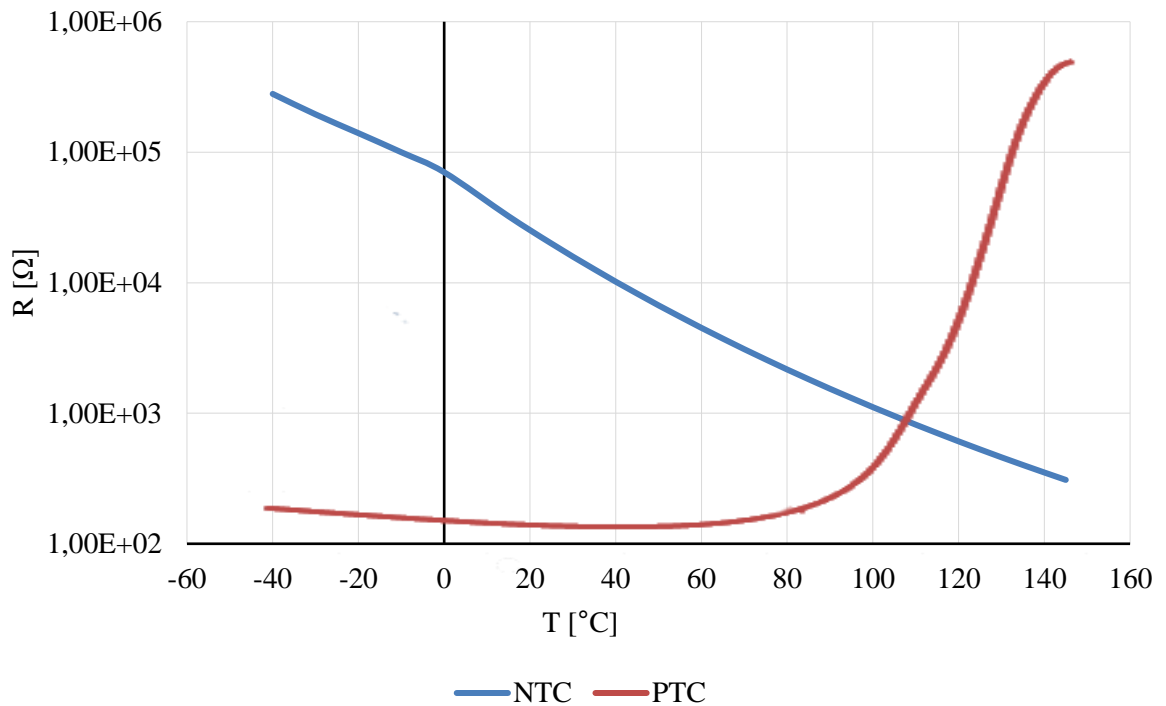
R_{25} je jmenovitý odpor při teplotě 25°C

T je teplota

Přesnější graf závislosti sestavíme pomocí Steinhart-Hartových koeficientů z rovnice (1.4).

$$R_T = e^{\left(A + B \cdot \frac{1}{T} + D \cdot \frac{1}{T^2} + C \cdot \frac{1}{T^3}\right)}[\Omega] \quad (1.6)$$

kde A, B, C, D jsou S-H koeficient



Obr. 1.4: Závislost odporu termistoru na teplotě

1.3.3 Polovodičové senzory s PN přechodem

Monokrystalické polovodičové senzory teploty s PN přechodem využívají teplotní závislosti propustně polarizovaného PN přechodu. Teplo dodává energii elektronům ve valenční vrstvě a ty snáze překračují zakázaný pás polovodiče. V případě PN diody polarizované v propustném směru je tak napětí U_D tím menší, čím větší je teplota (viz Obr. 1.5.) Pro toto napětí platí Shockleyova rovnice (1.7).

$$U_D = m \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) [V] \quad (1.7)$$

kde U_T je teplotní napětí

I_S je saturační proud v závěrném směru

I_D je proud v propustném směru

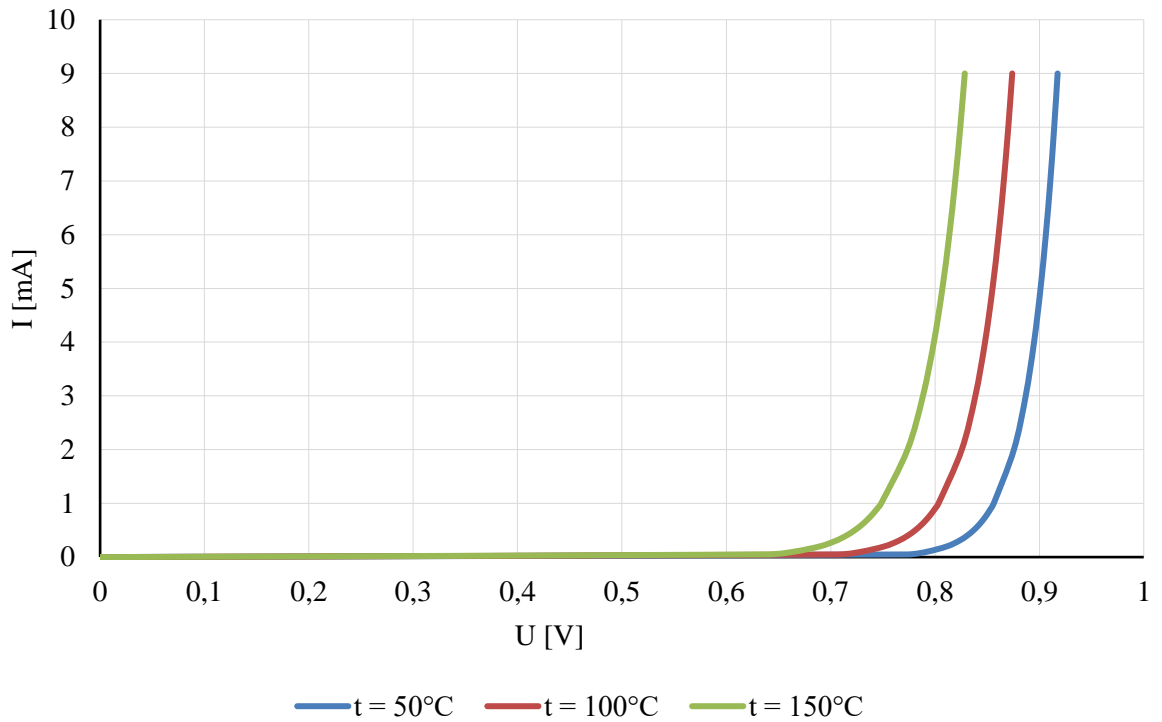
m je rekombinační koeficient polovodiče

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} [V] \quad (1.8)$$

kde k je Boltzmannova konstanta

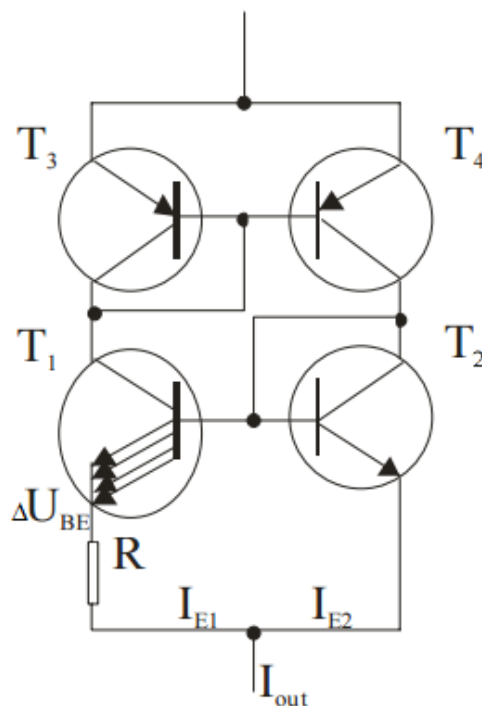
T je absolutní teplota

e je elementární náboj



Obr. 1.5: Závislost napětí diody v propustném směru na teplotě

Další z polovodičových součástek s PN přechodem, u kterých můžeme sledovat závislost napětí na teplotě, jsou bipolární tranzistory. Kromě běžných zapojení se společným emitorem používáme k měření teploty např. zapojení s proudovými zrcadly (Obr. 1.6), které je vhodné pro integrované obvody [6].



Obr. 1.6: Integrovaný PN senzor teploty s tranzistory [6]

Tranzistory T_3 a T_4 dodávají do proudového zrcadla s rozdílnou hustotou emitorových proudů T_1 a T_2 shodný proud I_1 a I_2 . Rozdílná proudová hustota emitorových přechodů vyvolá odlišné úbytky napětí na přechodech báze-emitor, jejichž rozdíl lze naměřit na odporu R . Pro napětí báze-emitor obecně platí:

$$U_{BE} = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_C}{I_S} \right) [V] \quad (1.9)$$

kde I_C je kolektorový proud

Saturační proud tranzistoru I_S je funkcí plochy přechodu. Vhodným upravením vzorce (1.9) a za předpokladu, že plocha přechodu tranzistoru T_1 je rovna r -násobku plochy tranzistoru T_2 , dostáváme vztah pro poměr kolektorových proudů (1.10) a proudových hustot (1.11).

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{E2} e^{\frac{U_{BE2}}{U_T}}}{S_{E1} e^{\frac{U_{BE1}}{U_T}}} \quad (1.10)$$

kde S_E je plocha emitorového přechodu

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{\frac{I_2}{r \cdot S_{E1}}}{\frac{I_1}{S_{E1}}} = e^{\frac{U_{BE2} - U_{BE1}}{U_T}} = r \quad (1.11)$$

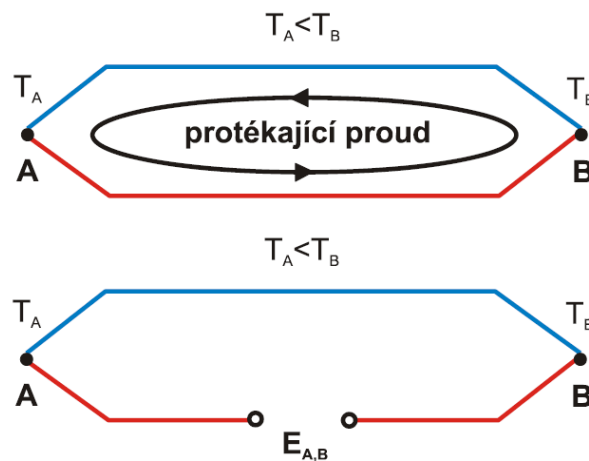
kde J je proudová hustota

Výsledný vztah pro rozdíl napětí báze-emitor v závislosti na teplotě:

$$\Delta U_{BE} = U_T \cdot \ln r [V] \quad (1.12)$$

1.3.4 Termoelektrické senzory

Termoelektrické senzory nebo také termočlánky, fungují na prostém principu spojení dvou různých kovů, mezi kterými v případě rozdílné teploty konců termočlánku protéká elektrický proud. Termoelektrické napětí dostáváme po rozpojení v jakémkoliv místě obvodu (viz Obr. 1.7) [6].



Obr. 1.7: Princip termočlánku [6]

Popisovaný jev nese jméno svého objevitele (Seebeckův jev) a pro termoelektrické napětí platí vztah (1.13).

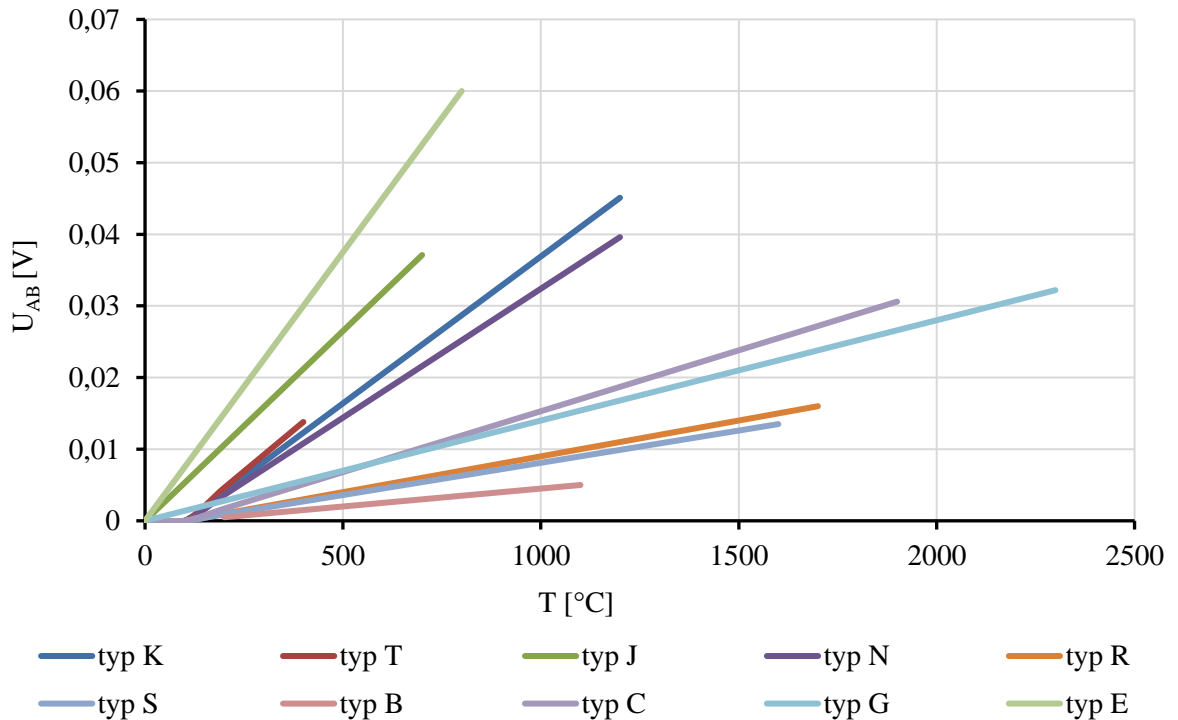
$$dU_{A,B} = S_{A,B} dT \quad (1.13)$$

kde $S_{A,B} = S_A - S_B$ jsou Seebeckovy koeficienty
 T je Teplota

Pro malý rozdíl teplot můžeme psát:

$$U_{A,B} = S_{A,B} (T_1 - T_2) [V] \quad (1.14)$$

Termočlánky jsou označovány podle normy IEC 584.1 velkým písmenem, které představuje přesně stanovenou dvojici použitých kovů (např. J = Fe – CuNi, K = Cu – CuNi atd.). Závislost napětí na teplotě pro jednotlivé druhy termočlánku můžete vidět na Obr. 1.8.



Obr. 1.8: Závislost napětí jednotlivých typů termočlánků na teplotě

1.4 Bezdotykové senzory teploty

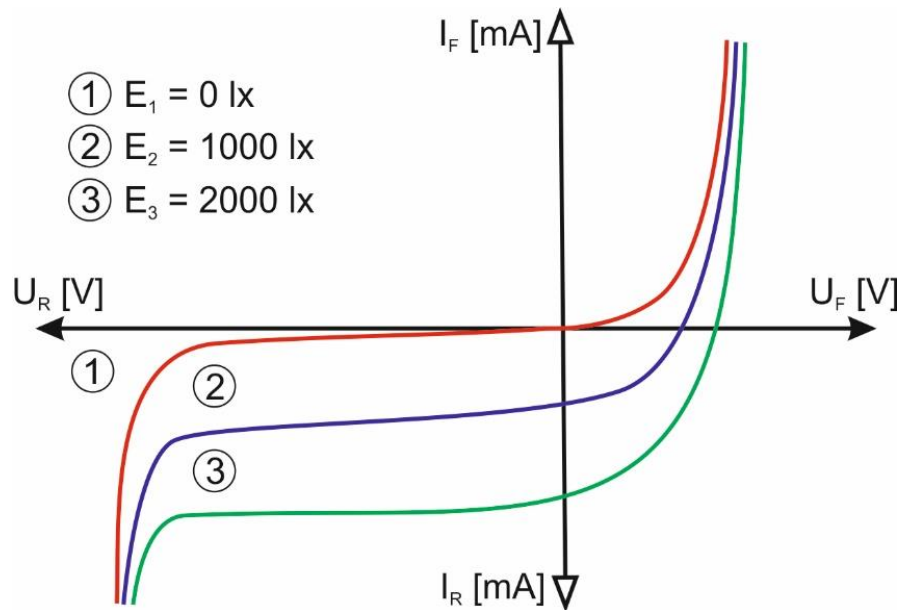
Bezdotykové senzory teploty využívají Planckova zákona, podle něhož těleso o teplotě vyšší než 0 K vyzařuje elektromagnetické záření, které je úměrné jeho teplotě. Bezdotykové senzory využívají k detekci pouze část blízkého a středního infračerveného světla a dle principu je dělíme na kvantové a tepelné.

1.4.1 Kvantové senzory

Kvantové senzory teploty využívají závislosti počtu dopadajících fotonů v infračerveném pásmu na teplotě. V případě, že mají dopadající fotony energii větší, než je energie zakázaného pásu, generují pár elektron-díra a tím mění fyzikální vlastnosti senzoru. Pro bezdotykové kvantové snímání teploty používáme především fotorezistory a fotodiody.

Jak vyplývá z názvu, fotorezistor s teplotou mění svůj odpor. Fotodioda už podle svého názvu tak lehce definovatelná není. Její snímací funkce se liší podle toho, v jakém kvadrantu volt-ampérové charakteristiky se pohybujeme. V 1. kvadrantu volt-ampérové charakteristiky se chová jako běžná dioda se závislostí na napětí v propustném směru. Ve 3. kvadrantu

se fotodiody chová jako fotocitlivý odpor a nakonec ve 4. kvadrantu jako foto-napěťový článek, jehož napětí je závislé na teplotě (viz Obr. 1.9) [7] a [8].



Obr. 1.9: V-A charakteristika fotodiody [8]

1.4.2 Tepelné senzory

Tepelné bezdotykové senzory teploty, stejně jako kvantové senzory, snímají teplotu v závislosti na počtu dopadajících fotonů. Absorbované fotony způsobují oteplení citlivé části senzoru a toto oteplení se vyhodnocuje nepřímo přes dotykové senzory teploty. Do této kategorie senzorů spadají termočláňkové baterie, bolometry a pyroelektrické senzory.

Termočláňkové baterie jsou tvořeny sériovou kombinací termočláňků (až desítky termoelektrických senzorů), které fungují na principu prezentovaném v kapitole 1.3.4. Abychom termoelektrické senzory mohli využívat jako bezdotykové, je třeba natřít snímací plochu senzoru černým lakem, který zvyšuje absorpci. Absorpce elektromagnetického záření způsobí oteplení, a to dále způsobuje změnu termoelektrického napětí.

Podobně je tomu také u *bolometrických senzorů*. Ty využívají kovový odporový materiál natřený černým lakem v pouzdře s okénkem, které z dopadajícího záření filtruje infračervenou část a ta otepluje odporový materiál, jehož odpor se s teplotou mění.

Pyroelektrické senzory teploty jsou tvořeny krystalem s dvěma elektrodami, z čehož jedna elektroda je propustná pro infračervené světlo. Oteplení způsobené dopadajícím světlem mění orientaci polárních molekul. Vzniká polarizace, která generuje na elektrodách senzoru náboj [9].

2 Vybrané senzory teploty

Vzhledem k požadavkům na naši úlohu (přibližně 200 senzorů pro vícekanálové měření a sběr dat s jejich následnou vizualizací na počítačovém 3D modelu lidské ruky) preferujeme digitální senzory, které podporují sběrnice, nebo zřetěžené zapojení za použití co nejmenšího počtu vodičů, a zároveň co nejmenší velikost pouzdra. Analogové sensorové pole by vyžadovalo velký počet vodičů, které by mohly způsobovat samo-ohřev a zkreslení naměřených dat, nehledě na složitější řešení multiplexního zařízení a časovou náročnost obsluhy všech senzorů.

2.1 DS18B20 od Maxim integrated

Digitální teploměr DS18B20 od Maxim integrated (dříve Dallas Semiconductors) pracující na principu proudových zrcadel (viz kapitola 1.3.3) je schopný měřit v rozsahu -55 až 125 °C a v rozsahu -10 až 85 °C s garantovanou přesností $\pm 0,5$ °C. Rozlišení teploty je programovatelné s přesností na 9 až 12 bitů, tzn. $0,5$ až $0,0625$ °C. S vyšším rozlišením se však zvyšuje čas potřebný pro převod až na 750 ms/senzor. Ke komunikaci je použita sběrnice navržená firmou Dallas Semiconductor.

Sběrnice 1-wire je navržena pro asynchronní poloduplexní přenos s velkým dosahem (až 500 m), ale s nižší datovou rychlostí než např. I²C. Sběrnice používá pro komunikaci jeden datový (DQ) a dva napájecí vodiče (GND, V_{DD}). Má vždy pouze jeden řídicí obvod Master a jeden či více ovládaných zařízení typu Slave. Vzhledem k tomu, že všechna zařízení jsou připojena přes otevřený kolektor, potřebujeme pull-up rezistor, který zajišťuje na sběrnici vysokou úroveň. Senzory teploty DS18B20 lze využívat i v tzv. parazitním režimu využívající pouze vodiče GND a DQ. Senzor je v tomto režimu napájen interním kondenzátorem nabíjeným přes datový vodič. Každé čidlo má od výrobce přiděleno unikátní 64-bitové číslo, které v případě více zařízení na společné sběrnici slouží k adresaci konkrétního senzoru (Tab.2.1).

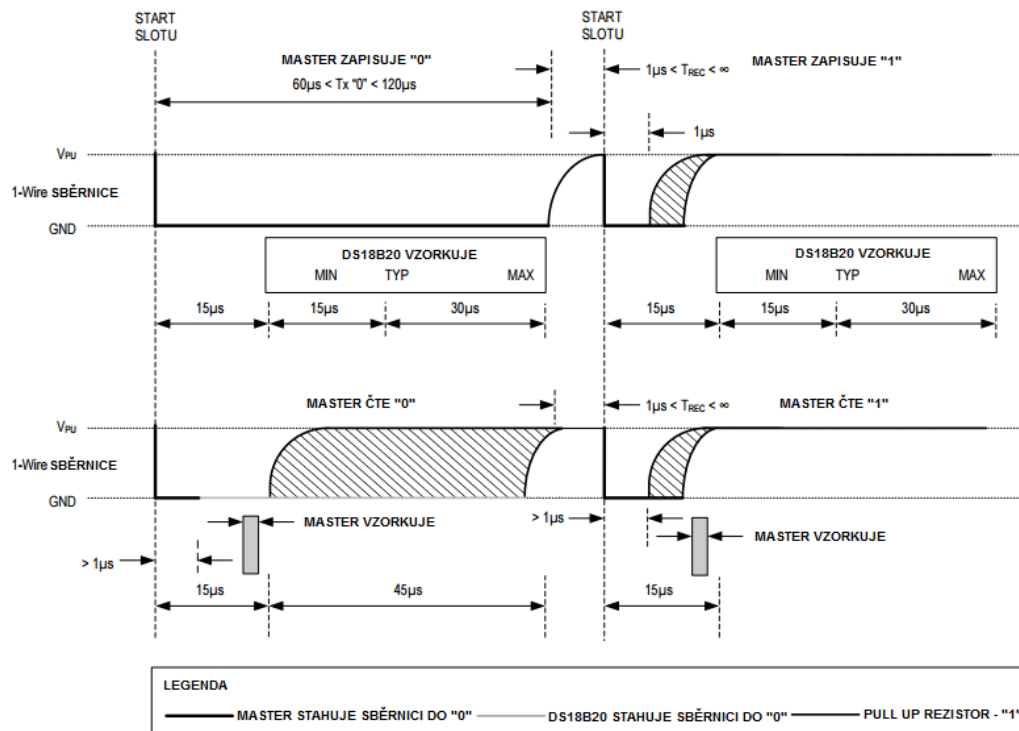
Tab. 2.1: Unikátní 64-bitové registrační číslo

MSB	64-bitové registrační číslo v paměti ROM			LSB	
8 bitů - CRC		48 bitů - Sériové číslo		8 bitů – tzv. Family kód	
MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB

Family kód je přiřazen na základě typu zařízení, pro senzory DS18B20 tedy 28h. Prostředních 48 bitů slouží jako jedinečné sériové číslo. Cyklický redundantní součet (CRC) je vypočítán ze spodních 56 bitů a používáme jej k ověření adresy [10].

Známe-li sériová čísla jednotlivých zařízení na sběrnici, začíná vlastní komunikační cyklus reset pulzem od Master stanice (stažení sběrnice do nízké úrovně minimálně na 480 μ s) a Match Rom příkazem (55h) následovaným 64 bitovým adresovým číslem požadované Slave stanice. V opačném případě musíme před oslovením jednotlivých zařízení provést detekci zařízení na sběrnici Search Rom (F0h) a zapsat jejich adresy do mikrokontroléru (dále MCU). Po této inicializační části můžeme spustit převod teploty v osloveném zařízení a čtení dat příkazem Convert T (44h). Kromě příkazu pro převod teploty má DS18B20 programovatelnou minimální a maximální teplotu – Write Scratchpad (4Eh). Senzor při překročení mezí nastaví Alarm flag, pro který má Master stanice speciální komunikační příkaz, jímž osloví všechna čidla na sběrnici bez užití konkrétní adresy – Alarm Search (ECh) [11].

Vzhledem k tomu, že nemáme na 1-wire sběrnici společný rozvod hodin a komunikaci provádíme asynchronně, je nutné dodržovat časy specifické pro jednotlivé bity. Logická „0“ musí být na sběrnici po dobu 60 – 120 μ s, po této době musí sběrnice přejít alespoň na 1 μ s do vysoké úrovně, logická „1“ naopak 1 μ s pulzem začíná. Vzorkování dat na sběrnici nastává po uplynutí 15 μ s od překlopení z klidového stavu (Obr. 2.1).



Obr. 2.10: Časování na 1-wire sběrnici [10]

Nevýhodou těchto senzorů je poměrně dlouhá doba převodu v případě měření s přesností na více jak 10 bitů (375 ms), k čemuž musíme přičíst ještě režii komunikace. Pokud bychom chtěli převod např. 200 senzorů uskutečnit do jedné sekundy, a to i s nejnižší přesností na 9 bitů, museli bychom realizovat 20 samostatných sběrnic a stejný počet Master řídicích jednotek.

2.2 TMP107 od Texas Instruments

Senzor teploty TMP107 od Texas Instruments pracuje od -40 do 125 °C s přesností $\pm 0,7$ °C a rozlišením na 14 bitů (0,015625 °C). Teplotní čidla je možné po třech vodičích řetězit (až 32 zařízení) a propojit přes UART vysílač/přijímač s komunikační sběrnicí SMAART Wire až do vzdálenosti několika stovek metrů. Konfigurace čipu je přístupná přes sadu registrů.

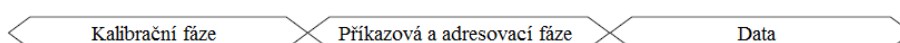
Naměřená 14-ti bitová hodnota sdílí 16-ti bitový prostor s indikačním bitem „BUSY“ a bitem „NUS“. Tyto bity se vztahují k EEPROM paměti, v níž je uloženo unikátní sériové identifikační číslo, unikátní kalibrační data a záloha, která se v případě resetu nahraje do příslušných registrů a ty se tak nemusí opět konfigurovat. Stejně jako u DS18B20 je možné nastavit teplotní limity. Jednotlivé hodnoty teplotního limitu mají vlastní registry. Překročení nastavené teploty je signalizováno Limit flag bitem v konfiguračním registru. Tento registr kromě toho slouží také k nastavení režimu měření (kontinuální mód a jednorázový mód). V kontinuálním módu je programovatelná perioda měření (od 15 ms do 16 s). V jednorázovém režimu je periodické měření možné na základě opakovaného impulzu z MCU. Čidla v tomto módu pracují se sníženou spotřebou a zvýšenou přesností.

Komunikační protokol SMAART Wire rozlišuje dva základní typy operací – adresové a příkazové. Adresové operace se používají k individuálnímu, nebo globálnímu zápisu a čtení z konkrétního místa v paměťové mapě. Příkazové operace slouží k inicializaci adres zřetěžených senzorů (95h), oslovení posledního čipu v řetězci za účelem získání jeho adresy (57h), ke globálnímu software resetu (5Dh) a globálnímu smazání varování o překročení nastaveného limitu (B5h a 75h) (Obr. 2.2).

Adresové operace

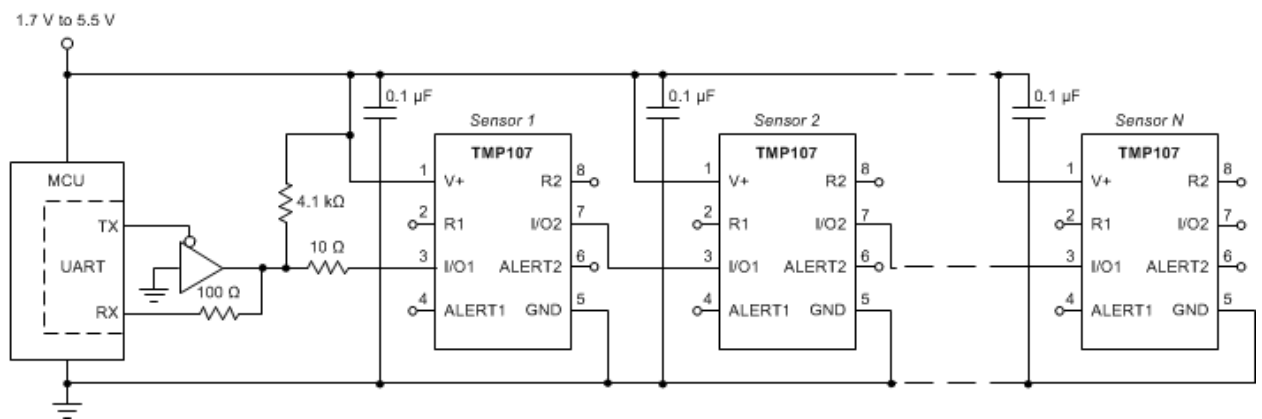


Příkazové operace



Obr. 2.2: Adresovací a příkazové operace na SMAART Wire sběrnicí

Jednotlivé fáze operací se skládají z 10 bitů (Start bit, 8 bitů dat a Stop bit). Každá operace začíná kalibrační fází (55h). V této fázi dáváme znamení o zahájení komunikace a informaci o přenosové rychlosti. Příkazová a adresová fáze se liší podle typu operace. Pokud provádíme adresové operaci, slouží první tři bity k indikaci, zda budeme data číst, nebo zapisovat, zbylých pět bitů udává, jakého senzoru se bude příkaz týkat ($2^5 = 32$, odtud maximální počet senzorů v řetězci). Příkazová operace adresaci senzoru nevyužívá a celá osmice bitů tak slouží k rozlišení příkazu. Adresa je každému senzoru přidělena na základě pořadí v řetězci a uložena v EEPROM paměti. K výběru registru nebo bloku v paměti EEPROM, s kterými se má pracovat, slouží první 4 bity třetí fáze komunikačního protokolu. Zbylé 4 bity jsou 1010b. V posledním bloku komunikace odesíláme/přijímáme data [12] a [13].



Obr.2.3: Typické zapojení TMP107 [12]

Pokud bychom chtěli čidlo používat v jednorázovém módu, tedy za snížené spotřeby a zvýšené přesnosti, museli bychom před každým měřením provést globální zápis do konfiguračního registru. Na základě zápisu proběhne převod teploty, který trvá 20 ms. Pro vyčtení naměřené teploty z EEPROM paměti senzoru bychom použili příkaz pro globální čtení. Data by byla posílána po bytech v pořadí od prvního k poslednímu senzoru v řetězci (pro 32 zařízení 64 datových bytů). V případě požadavku změření teploty 200 senzory během jedné sekundy bychom potřebovali 7 oddělených sběrnic. Požadavky na rychlost měření jsou tedy v případě tohoto senzory splněny. Nevýhodou je však velikost pouzdra SOIC-8 (5 x 6,2 mm včetně vývodů) a s tím spojená dynamická odezva senzoru.

2.3 TMP05 od Analog Devices

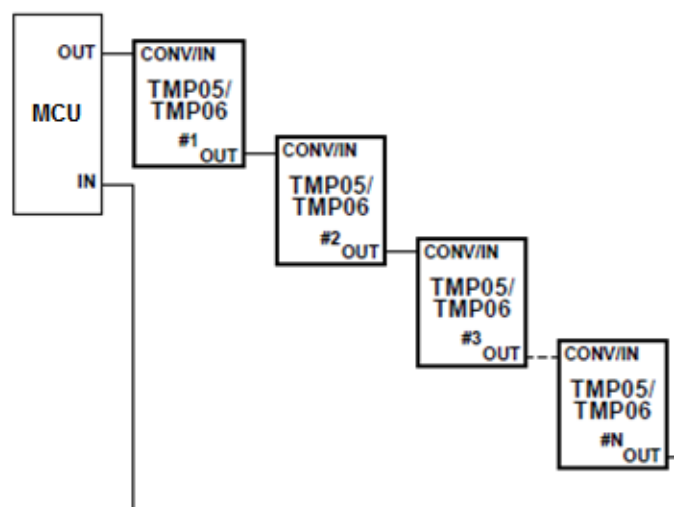
TMP05 je teplotním senzorem, který má z již představených čidel největší teplotní rozsah, tedy -40 až 150 °C, ale zároveň nejmenší garantovanou přesnost ± 1 °C. Převod teploty je prováděn Σ - Δ modulátorem s DAC ve zpětné vazbě s přesností na 12 bitů (0,0625 °C). Výstupní teplota není, stejně jako u předchozích senzorů, dána datovým slovem, ale PWM výstupem, jehož střída nese informaci o teplotě. Vzorec pro výpočet teploty je dán vztahem 2.1.

$$T = 421 - \left[751 \cdot \left(\frac{T_H}{T_L} \right) \right] [^{\circ}\text{C}] \quad (2.1)$$

kde T_H je doba vysoké úrovně

T_L je doba nízké úrovně

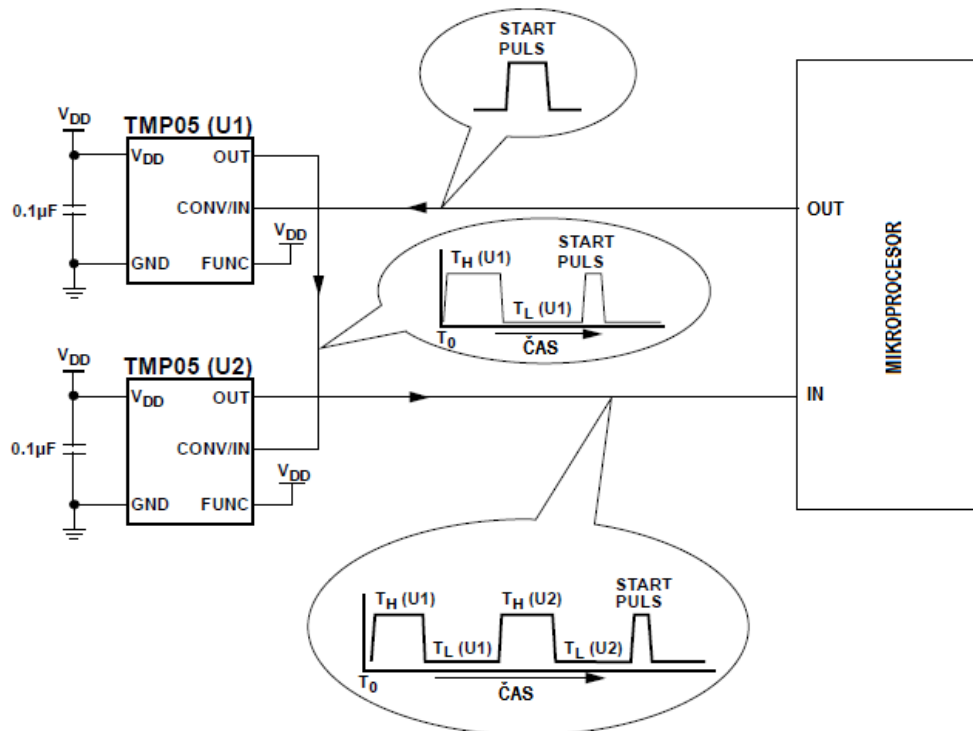
TMP05 lze řetězit v tzv. „Daisy Chain“ módu (Obr. 2.4). Maximální počet zařízení není specifikován a je tak omezen hlavně maximální požadovanou délkou převodu teploty, neboť délka převodu jednotlivých senzorů se sčítá.



Obr. 2.4: Daisy chain zapojení TMP05 [14]

Kromě zřetěženého zapojení je možné využívat jeden senzor v jednorázovém nebo kontinuálním módu, což je dáno hodnotou na pinu FUNC. V zřetěženém a jednorázovém módu je zahájení měření teploty dáno na základě impulsu na vstupní pin CONV/IN. Tento pulz musí být v případě Daisy chain módu minimálně 20 ns v nízké logické úrovni a poté mezi 20 ns a 25 μ s ve vysoké logické úrovni. Po start pulzu je zahájeno měření prvního senzoru, po jehož dokončení je signál společně se startovacím pulzem na výstupu OUT

v pořadí startovací impuls a výstupní PWM signál nesoucí informaci o teplotě. Čidlo se chová pro předchozí změřené PWM signály jako buffer. Do mikroprocesoru tak přichází PWM výstupní signál v pořadí od posledního senzoru v řetězci k prvnímu (Obr. 2.5) [14].



Obr. 2.5: Řazení PWM výstupů jednotlivých senzorů TMP05 [14]

Doba převodu jednoho senzoru je průměrně 100 ms. Chceme-li tedy vyčíst teplotu ze všech senzorů do jedné vteřiny, můžeme za sebe zařadit max. 10 čidel. Z tohoto faktu plyne, že musíme použít 20 Input capture (dále IC) jednotek pro detekci náběžných a sestupných hran a měření jejich délky. Tento počet IC jednotek však není vůbec žádným omezením, neboť mikroprocesory disponují často více jak 10 čítači, z nichž každý může mít až čtyři nezávislé IC jednotky. Senzor TMP05 se vyrábí ve dvou pouzdrech SC-70 (2,2 x 2,4 mm včetně vývodů) a SOT-23 (3 x 3 mm včetně vývodů). V případě SOT-23 je to téměř čtvrtina a v případě SC-70 skoro šestina plochy senzoru TMP107 od Texas Instruments.

3 Realizace senzorového systému

3.1 Hardware

3.1.1 Mikroprocesor

Ke zpracování signálu z vybraných senzorů teploty TMP05 od Analog devices byl vybrán mikroprocesor, resp. v první fázi vývojový kit, od společnosti STMicroelectronics STM32F446RE. Procesor disponuje 32-bitovým jádrem ARM Cortex-M4 s architekturou RISC pracující s frekvencí až 180 MHz a flash pamětí o velikosti 512 kB. Jádro má matematický koprocesor FPU, CRC jednotku pro kontrolní součet, rozsáhlý počet vstupů a výstupů periférií připojených ke dvěma APB sběrnicím, dvěma AHB sběrnicím a jedné multi-AHB sběrnici. Platforma podporuje SPI, USART, UART, I²C, CAN a další komunikace stejně jako analogově-digitální a digitálně-analogový převod. Dále má dvanáct 16-bitových a dva 32-bitové čítače mající až čtyři kanály (Příloha A Obr. A1).

Právě velký počet čítačů byl hlavním důvodem výběru tohoto mikroprocesoru. Čítače TIM1 až TIM5 a TIM8 mají 4 capture/compare (dále CC) kanály, TIM9 a TIM12 mají po dvou kanálech a TIM10, TIM11, TIM13 a TIM14 jeden kanál. Celkem je tedy dostupných 32 CC jednotek. Vzhledem k velkému počtu použitých čítačů resp. pinů a případným požadavkům na rozšíření systému bude v další fázi použito mikroprocesorové pouzdro LGFP100. V příloze A Obr. A2 jsou vyznačeny použité piny pro 24 CC čítačů (tzn. včetně čtyř kanálů pro případné rozšíření), jeden čítač pro spouštění měření a dva pro sériovou UART komunikaci.

UART komunikace s FTDI převodníkem na USB zajišťuje řízení měření a přenos dat k zpracování v počítači. Během každé periody měření je přeneseno přibližně 10kbit dat včetně start a stop bitu (odpovídá 200 senzorům). Maximální doba výstupního pulzu jednoho senzoru je 142,1 ms. Doba převodu celého řetězce deseti senzorů tedy trvá 1421 ms. Přenos 10 kbit dat při rychlosti 19200 bit/s trvá 521 ms, při rychlosti 38400 bit/s pak 260,5 ms. Chceme-li minimální periodu měření 1,5 s, pak musí být přenosová rychlost sběrnice zaručující bezproblémový chod minimálně 38400 bit/s. V našem případě je v jednom řetězci reprezentující jeden prst testovacího přípravku na pracovní ochranné rukavice v sérii maximálně 12 senzorů, čemuž musí být přizpůsobena perioda měření s délkou minimálně 2 s při zachování stejné, nebo vyšší přenosové rychlosti [15].

3.1.2 Model lidské ruky

Model lidské ruky byl vyroben ve spolupráci s Regionálním technologickým institutem pomocí 3D tisku z polyamidu PA6 plněného krátkými uhlíkovými vlákny s tepelnou vodivostí $0,28 \text{ W/(m.K)}$ (Obr. 3.1). Kanálky na povrchu ruky slouží pro zapuštění senzorů a přívodních vodičů. V první fázi experimentu byl použit model z volně šiřitelné databáze 3D objektů. Rozměry finálního modelu budou vycházet z normovaných modelů pro ponorem vyráběné gumové rukavice (Příloha B Obr. B.1). Vystihnout všechny geometrické parametry tak, aby bylo možné testovat většinu komerčně vyráběných rukavic při zachování relativně snadné a opakovatelné technické realizace, je velmi podstatný problém. Testování pánských a dámských rukavic napříč rasovou příslušností je v rámci jednoho modelu téměř vyloučené. Kromě vnějších drážek pro senzorové elementy bude model disponovat regulovaným rozvodem kapaliny, která bude simulovat krevní oběh. Tato skutečnost je nastíněna již na prototypu modelu (viz ventily v oblasti řezu zápěstí na Obr. 3.1). Rukavice budou tepelně namáhány statickým sálavým zdrojem tepla, z toho důvodu bude model umístěn na otočné platformě s rozsahem $\pm 180^\circ$ s možností naklápění až o $\pm 45^\circ$.



Obr. 3.1: Model lidské ruky vyrobený pomocí 3D tisku

Senzory budou soustředěny především v oblasti prstů a hřbetu ruky. Na každém prstu bude celkem 23 lineárně rozložených senzorů. Pro lepší pokrytí teplotního pole se pozice senzorů na bocích a hřbetu prstu střídají. Senzor na boku prstu je tedy v pozici mezi senzory na hřbetu prstu a opačně. Další významná část senzorů bude rozmístěna na hřbetní části ruky, zhruba polovina jejich počtu bude uvnitř dlaně a přibližně 29 senzorů bude v oblasti zápěstí (Tab. 3.1 a Příloha B Obr. B.2).

Tab. 3.1: Rozmístění senzorů teploty

	Hřbet	Dlaň	Pravý bok	Levý bok	Špička	Celkem	
Palec čl. 1	2	2	2	2	1	17	111
Palec čl. 2	2	2	2	2	0		
Ukazovák čl. 1	2	2	2	2	1	24	
Ukazovák čl. 2	2	2	2	2	0		
Ukazovák čl. 3	2	2	2	1	0		
Prostředník čl. 1	2	2	2	2	1	23	
Prostředník čl. 2	2	2	2	2	0		
Prostředník čl. 3	2	2	1	1	0		
Prsteník čl. 1	2	2	2	2	1	23	
Prsteník čl. 2	2	2	2	2	0		
Prsteník čl. 3	2	2	1	1	0		
Malík čl. 1	2	2	2	2	1	24	
Malík čl. 2	2	2	2	2	0		
Malík čl. 3	2	2	1	2	0		
Dlaň	20						89
Hřbet	40						
Boky a zápěstí	29						
Celkem							200

3.1.3 Realizace senzorového pole

Vzhledem k velkému počtu vodičů použitých při realizaci senzorového pole a jejich společnému umístění na povrchu modelu lidské ruky, je nutné zamezit rušení vnikajícímu do tohoto systému a přeslechům mezi jednotlivými vodiči. Na povrchu modelu bude pohromadě pár napájecích vodičů a signálové vodiče pro zahájení měření a výstupní naměřený signál. Jejich počet je závislý na počtu senzorových elementů. Na základě tohoto faktu jsou k rozvodu použity ploché mnohožilové kabely Metrofunk 8x (LIYC 2x0,14)-Y FLAT s průměrem přibližně 4 mm, které jsou uspořádány do vzájemně odstíněných kroucených dvoulinek.

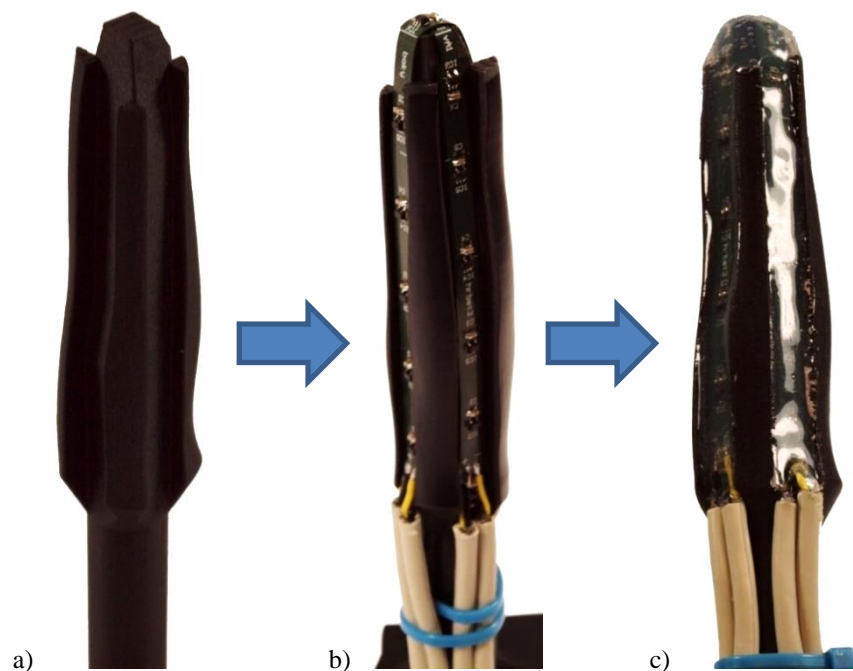
Jednotlivé řetězce senzorů jsou umístěny na dvouvrstvém kaptonovém flexibilním substrátu Pyralux AP8545R o tloušťce 100 μm s 18 μm vrstvou mědi a maskou o tloušťce 10 μm . Celková tloušťka flexibilního plošného spoje činí přibližně 150 μm (Příloha D Obr. D.1). Na Obr. 3.2 b) je tento senzorový element osazen v drážce prstu. Tloušťka plošného spoje má vliv na specifický ohybový rádius substrátu a charakteristickou impedanci. Čím větší tloušťka materiálu, tím větší ohybový rádius. Vzhledem k délce spoje pro výstupní signál (cca 17 cm), je nutné na něj nahlížet jako na spoj s vlastnostmi dlouhého vedení. Charakteristická impedance spoje by se měla pohybovat kolem 50 až 60 Ω , aby nedocházelo k příliš velkému proudovému odběru, nebo naopak k odrazům na vedení. Charakteristická impedance je závislá kromě tloušťky a typu materiálů (dielektrika) na šířce spoje. Čím větší šířka spoje, tím tlustší materiál je pro zachování stejné impedance potřeba (výpočet Příloha Obr. D.3).

Signály jsou rozděleny do dvou vrstev na signálové a napájecí. Horní Top vrstva obsahuje signálové vodiče. Napájecí napětí +3,3 V a GND jsou rozlity ve spodní Bottom vrstvě. Zemní potenciál slouží zároveň k odstínění v oblasti překrývání jednotlivých flexibilních elementů. K eliminaci vzniku zkratů, pro usnadnění pájení a pro větší mechanickou odolnost pájecích ploch je plošný spoj ovrstven nepájkivou maskou. Schéma a design plošného spoje navrženého ve spolupráci s katedrou technologií a měření viz Příloha D.

Plošné spoje jsou umístěny v drážkách o šířce 7 mm. Z důvodů zjednodušení návrhu plošných spojů jsou drážky rozděleny maximálně do tří planárních částí nekopírujících přesný povrch modelu. Vzhledem k této skutečnosti není hloubka drážek konstantní, nicméně je navržena tak, aby základní rovina povrchu modelu byla shodná s rovinou senzoru (Obr. 3.2 a). K zvýšení mechanické odolnosti a zachování rovinnosti plochy jsou drážky

s flexibilními substráty vyplněny zalévací hmotou (Obr 3.2 c). Hlavními parametry zalévací hmoty jsou tepelná vodivost a viskozita. Tepelná vodivost materiálu obklopující sensor včetně samotného substrátu by měla být co nejmenší, aby nedocházelo k výraznému ovlivnění dynamických parametrů měření. To však za předpokladu, že povrch senzoru je odkrytý a není pod vrstvou zalévací hmoty. Viskozita zalévací hmoty je důležitá vzhledem k členitosti modelu lidské ruky (drážky z pěti stran tělesa a v několika rovinách). K minimalizaci časové náročnosti a počtu kroků zalévání je požadována její co možná největší viskozita. Kromě zmíněných parametrů nás zajímá teplotní rozsah, doba a teplota vytvrzení. Tabulku s přehledem vhodných zalévacích hmot viz Příloha C Tab. C.1.

V rámci této práce byly testovány silikonové, epoxidové a polyuretanové zalévací hmoty s viskozitou od 22000 mPa.s až po pastovitou konzistenci a s tepelnou vodivostí od 0,2 W/m.K. Nejlepší vlastnosti v rámci zalévání má silikon ACC AS1740 (40000 mPa.s). Je dostatečně tekoucí na to, aby vyplnil všechny záhyby a samovolně vytvořil planární povrch, a zároveň disponuje dostatečnými povrchovými silami, které zabraňují odkapávání. Celková doba vyplnění drážek zmíněným silikonem je 3 hodiny. Pastovité hmoty AS2502 a EL100F nepotřebují mezi zaléváním jednotlivých stran modelu žádné prodlevy. Jejich celková doba zalévání se tak pohybuje v řádu minut. Nedochází u nich ovšem k samovolnému roztékání a planární povrch je nutné vytvořit pomocí stěrky. Nízko-viskózní epoxid Veropal HE 20-08 (22000 mPa.s) vyžaduje odstup minimálně 24 hodin mezi zalévacími kroky. Vytváří dokonale rovný povrch, ale vlivem malých povrchových sil dochází k odkapávání.



Obr. 3.2: Cyklus osazování a zalití modelu prstu

3.2 Software

3.2.1 Vícekanálové měření teploty

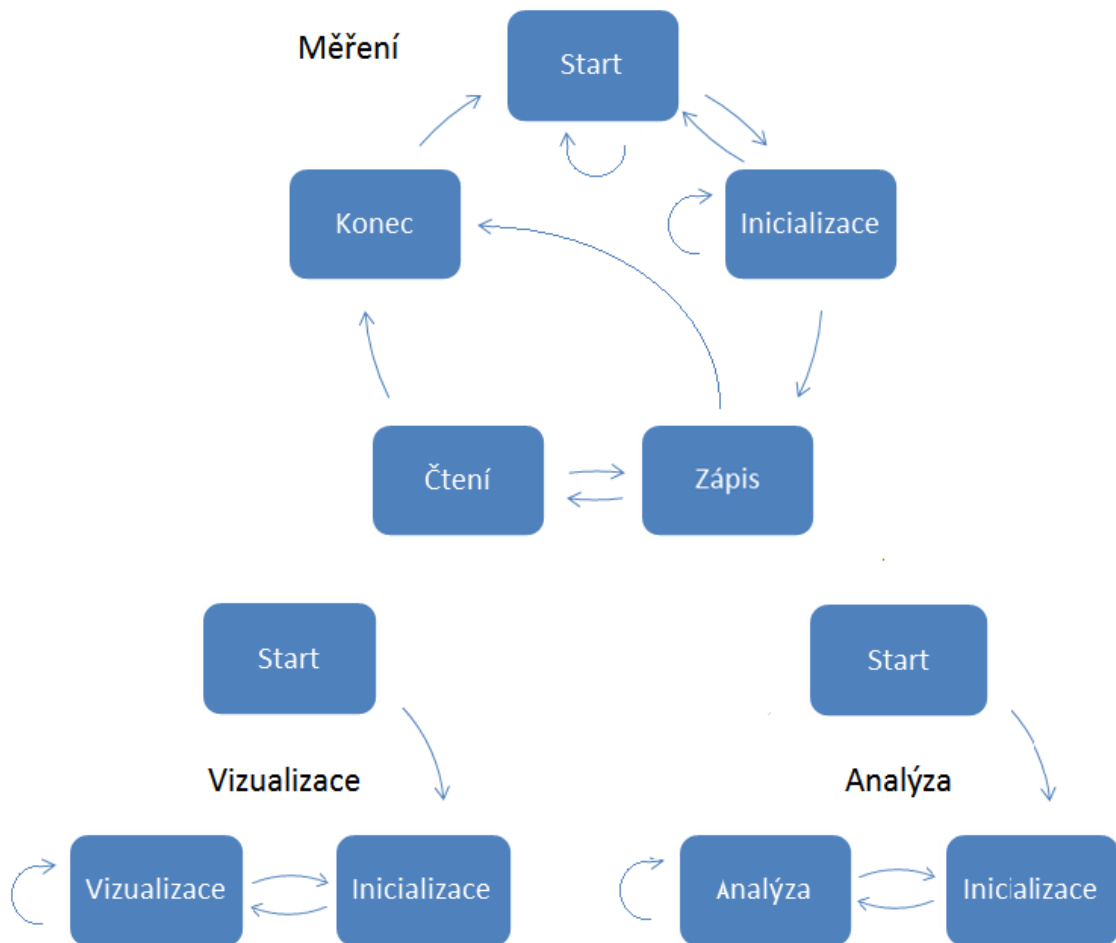
K vývoji programu mikroprocesoru bylo použito vývojové prostředí Keil uVision 5, které je použitelné pro velké spektrum jader ARM Cortex-A a Cortex-M a je orientováno na širokou skupinu výrobců. Tento program zahrnuje Debugger, ARM C/C++ kompilátor a základní middleware.

Vytvořený program nevyužívá knihoven dodávaných výrobcem. Veškerá funkcionality je zajištěna přímým zápisem do registrů. To představuje konfiguraci vstupních a výstupních pinů včetně jejich alternativních funkcí, logické úrovně v klidovém režimu (pull-up, pull-down, nebo vysoká impedance), typu výstupu (otevřený kolektor, push-pull) a rychlostí výstupních bran. Ke komunikaci prostřednictvím UART je nutná především konfigurace přenosové rychlosti a práce s datovým registrem. Největší část programu představuje práce s čítači. Jeden z nich je použitý v režimu jedno pulsního PWM pro startovací pulz senzorů TMP05. Další čítače jsou v režimu input capture reagující na náběžnou i sestupnou hranu signálu. Časové značky přechodů mezi úrovněmi signálu jsou zaznamenány při přerušení NVIC řadičem a jednotlivé kanály odlišeny na základě jejich status registru. Délka T_H nebo T_L je vypočítána jako rozdíl dvou po sobě jdoucích časových značek. Zvláštní pozornost si vyžadovala práce s předděličkou, aby jednotlivé délky T_H nebo T_L nezpůsobovaly přetečení čítačů. Přetečení čítače vlivem součtu dob T_H a T_L je však povoleno a softwarově ošetřeno (ukázka nastavení a výpočtu Příloha E). Výpočet teploty dle vzorce 2.1 je realizován již v mikroprocesoru, úlohou uživatelského softwaru je tedy řízení měření, ukládání naměřených dat do souboru a následná vizualizace.

3.2.2 Zpracování a vizualizace naměřených dat

Zpracování a vizualizace naměřených dat je provedena ve vývojovém prostředí LabVIEW od National Instruments. LabVIEW je prostředí, které je například na stejné úrovni jako programovací jazyk C, avšak s tím rozdílem, že není orientováno textově, ale graficky. Mezi hlavní domény patří možnost poměrně rychlého a efektivního používání měřicího a řídicího hardwaru nejen od společnosti National Instruments. Nespornou výhodou je také rozsáhlá paleta operací s daty, umožňující jejich analýzu a vizualizaci v reálném čase [16].

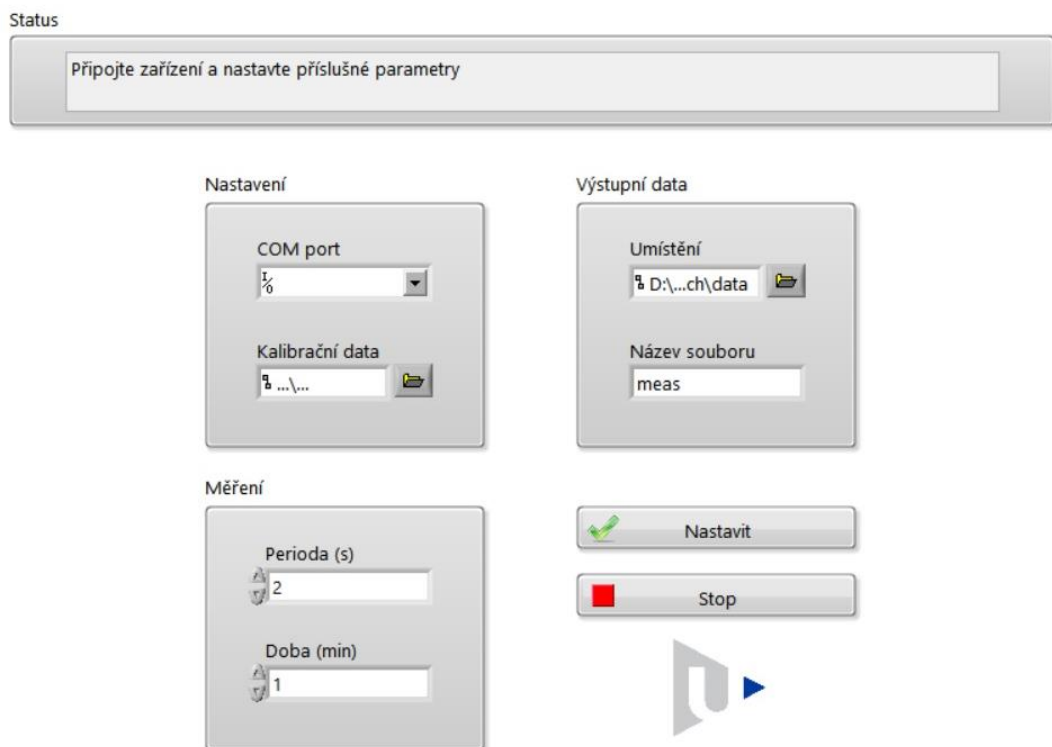
Navržený program se dělí na tři nezávislé části, a to *Měření*, *Vizualizace* a *Analýza*. Všechny větve jsou založeny na principu stavového automatu reagujícího na události iniciované uživatelem (obr. 3.3).



Obr. 3.3: Blokové schéma stavů a přechodů jednotlivých částí programu

Část *Měření* řídí frekvenci vzorkování teploty, kalibraci naměřených dat a jejich ukládání do souboru. Ve stavu *Start* nastavujeme výchozí hodnoty proměnných, cesty ke kalibračnímu souboru a pro uložení dat. Každých 100 ms testujeme, zda je dostupné zařízení připojené k virtuálnímu COM portu. Pokud je tato podmínka splněna, je možné potvrdit nastavení měření. Potvrzením schvalujeme také název souboru s naměřenými daty, nastavení periody a celkové doby měření (Obr. 3.4). Nastane-li chyba připojení, setrváváme ve stavu *Start* a opakujeme předchozí kroky, v opačném případě přecházíme do stavu *Inicializace*. Během *Inicializace* načítáme kalibrační data do proměnné typu pole, z periody a celkové doby měření vypočítáme celkový počet vzorků a vysíláme příkaz pro test komunikace. Pokud je komunikace navázána, přijmeme hlavičku souboru *Rel Time; Temp 1; ...; Temp N*; a pokračujeme do stavu *Zápís*. Nepodaří-li se během deseti

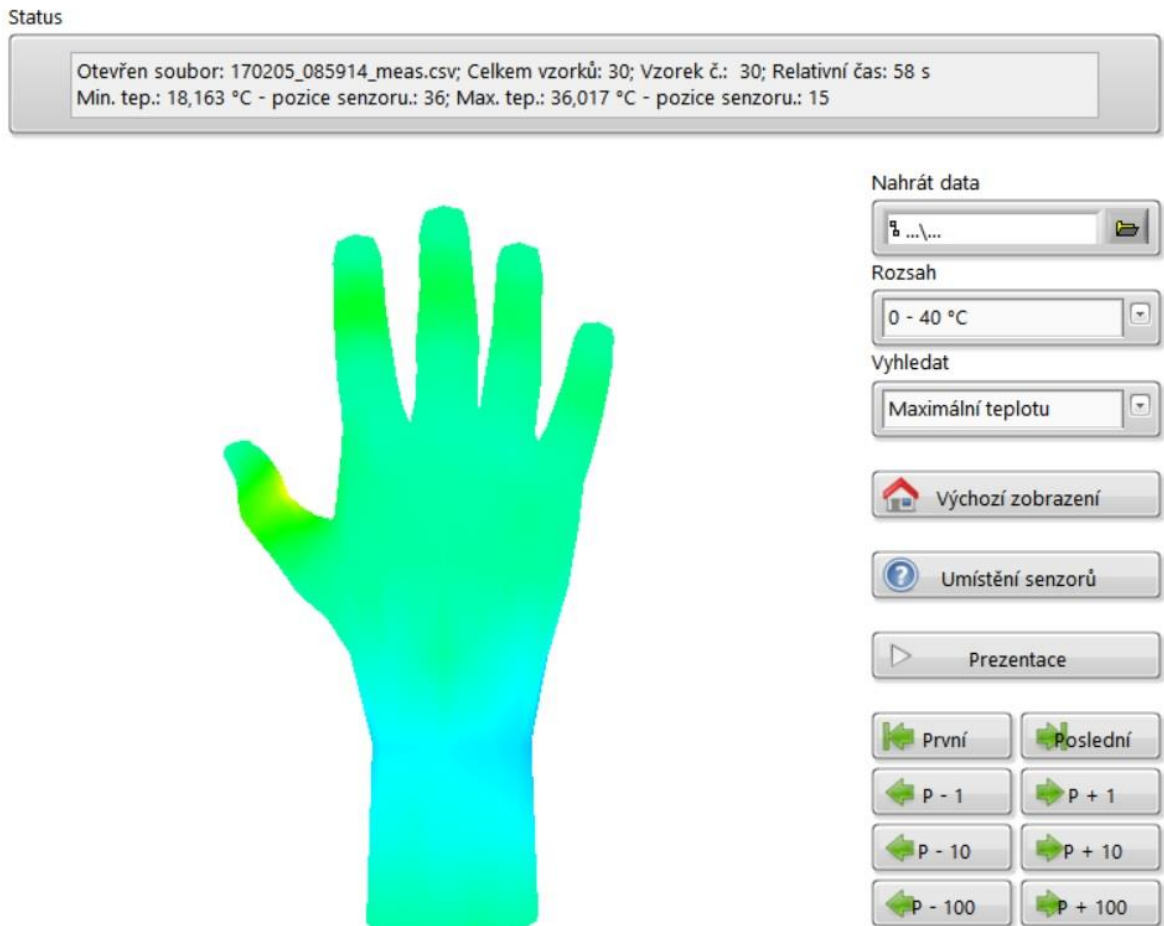
pokusů tento řetězec přijmout, vrátíme se zpět do stavu *Start*. Funkcí stavu *Zápis* je vyslání řídicího znaku, který spustí měřicí sekvenci a zajištění časování dle nastavení uživatelem. Minimální perioda byla zvolena 2 s. Naměřená data získáváme ve stavu *Čtení* z přijímacího bufferu, který po přečtení vyprazdňujeme. Naměřené teploty korigujeme pomocí kalibračních dat, rozšiřujeme o sloupec s informací o relativním čase měření a následně zapisujeme na konec souboru s daty. Přejít ze stavu *Zápis* do stavu *Čtení* a zpět je cyklicky vykonáván do doby, než proběhne předem vypočítaný počet měření, nebo nedojde-li k nečekanému odpojení zařízení. V opačném případě se dostáváme do stavu *Konec*, v němž je uzavřen soubor s daty následovaný návratem do výchozího stavu *Start*.



Obr. 3.4: Software pro zpracování a vizualizaci dat - Záložka měření

Blok *Vizualizace* pracuje s naměřenými teplotami a jejich zobrazením (Obr. 3.5). Stejně jako v případě měření, nastavujeme ve vizualizačním stavu *Start* výchozí hodnoty proměnných. V další fázi programu čekáme na výběr souboru s daty, po němž pokračujeme jejich zobrazením. Během stavu *Vizualizace* procházíme jednotlivé řádky souboru v závislosti na události vyvolané stiskem některého z tlačítek. K navigaci slouží tlačítka posunu o 1, 10 a 100 pozic vpřed a vzad, nebo možnost kontinuálního procházení souboru řádek po řádku s periodou 250 ms. Tlačítkem *Umístění senzorů* otevřeme pdf soubor s 2D obrázkem lidské ruky s vyznačeným fyzickým rozmístěním senzorů a jejich identifikačním číslem.

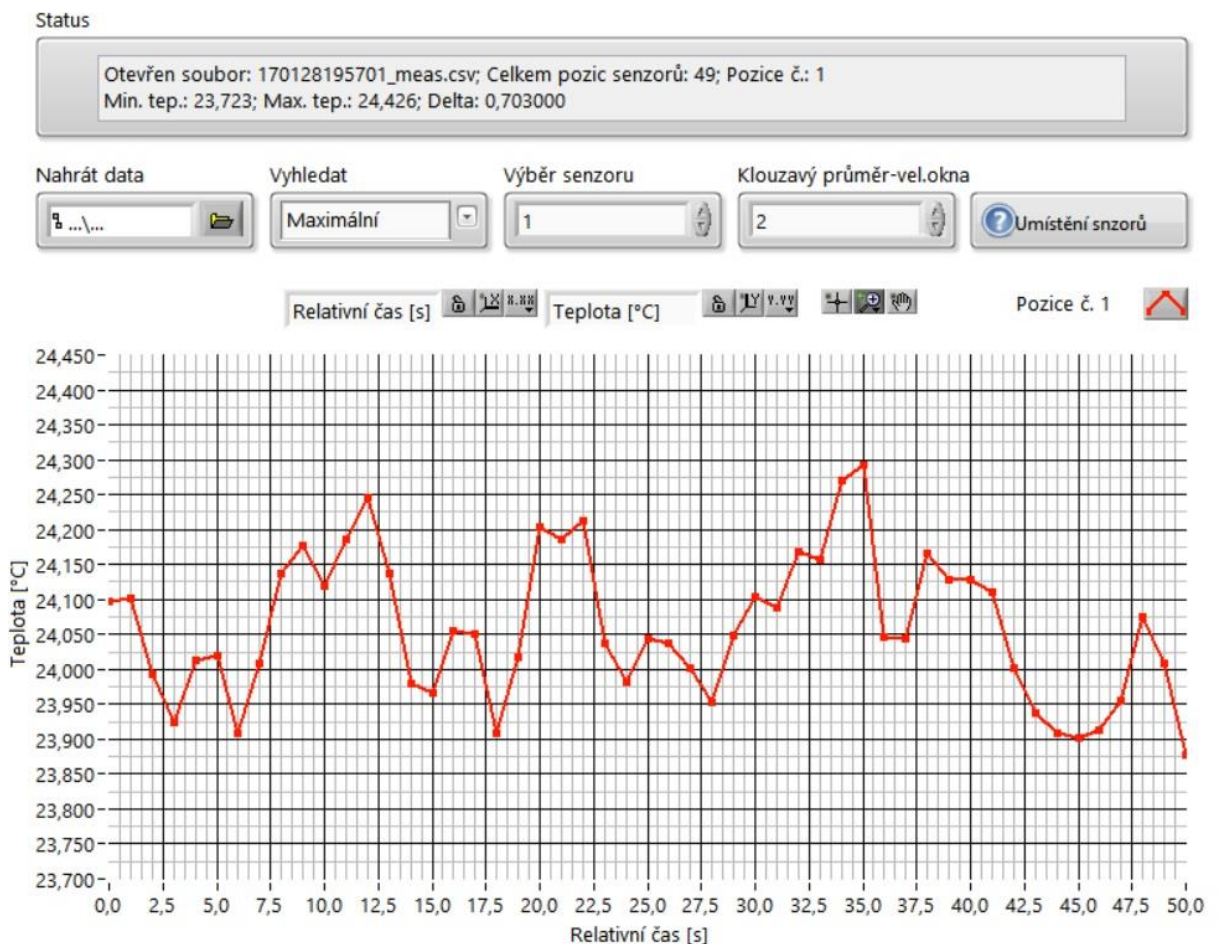
Výběrové menu *Rozsah* umožňuje vybrat minimální a maximální zobrazovanou teplotu, čímž také ovlivňujeme rozlišení zobrazovaných teplot. Funkce *Vyhledat* slouží pro rychlou detekci místa s nejnižší a nejvyšší teplotou a času, kdy je v rámci celého modelu největší rozdíl teplot. Není-li uživatelem vyvolána žádná událost, přecházíme cyklicky mezi stavy *Inicializace* a *Vizualizace* tak, abychom mohli kdykoliv vybrat jiný soubor s daty a analyzovat jej.



Obr. 3.5: Software pro zpracování a vizualizaci dat - Záložka vizualizace

Samotnou 3D vizualizaci lidské ruky a model teplotního pole obstarává tzv. *Expresní VI Sensor mapping*. Za expresní VI považujeme v názvosloví jiných programovacích jazyků knihovní funkci. Vstupními proměnnými této knihovny jsou pozice a akční plocha senzorů teploty, rozsah minimální a maximální zobrazované teploty a 3D model ve formátu *.stl*, který lze zároveň použít jako podklad pro 3D tiskárnu. Výpočet teplotního pole, možnosti změny zobrazení jako jsou přiblížení, posun a otáčení jsou již v rámci funkce plně integrovány a lze je měnit pouze v omezené míře. Výstupem tohoto expresního VI je 3D model zobrazující rozložení teploty na jeho povrchu.

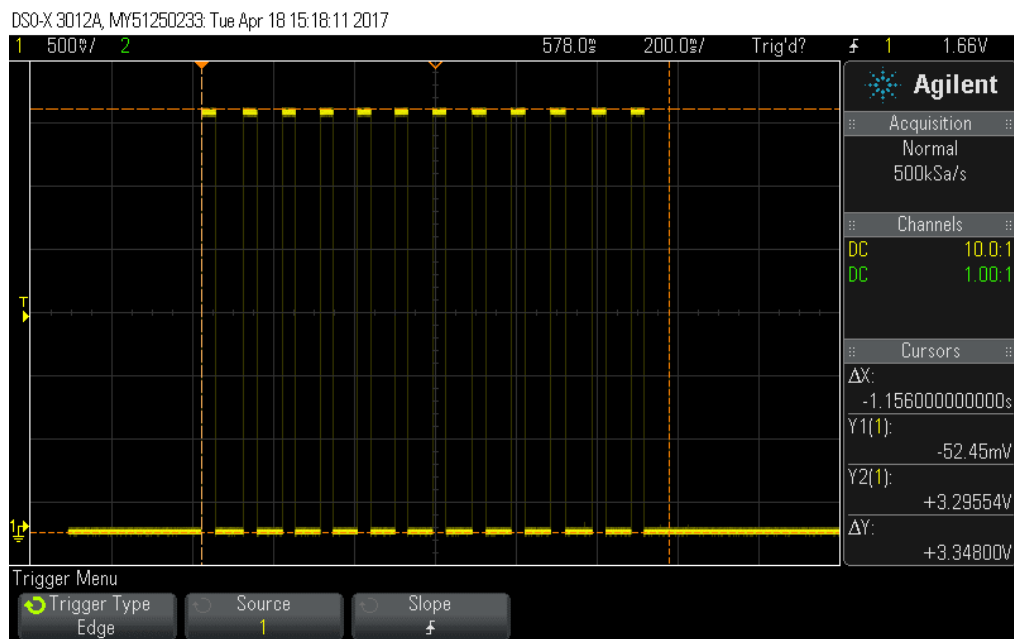
Posledním stavovým automatem je *Analýza* (Obr. 3.6). Záložka *Vizualizace* umožňuje zobrazení teplot ze všech senzorů v jeden čas. Díky *Analýze* můžeme naopak sledovat vývoj teploty na konkrétním místě ruky v celém čase. Stav *Start* a *Inicializace* kopírují funkce bloku *Vizualizace*. Základní rozdíl nastává při stavu *Analýza*, kdy naměřená data procházíme nikoliv po řádcích, ale po jednotlivých sloupcích. Takto vybraná data jsou zobrazena v 2D grafu s možností využití vyhledávací funkce pro nalezení senzoru, na kterém byla naměřena maximální a minimální teplota a maximální delta naměřených hodnot. Pro snazší identifikaci teplotního trendu je implementována funkce klouzavý průměr s volitelnou velikostí okna.



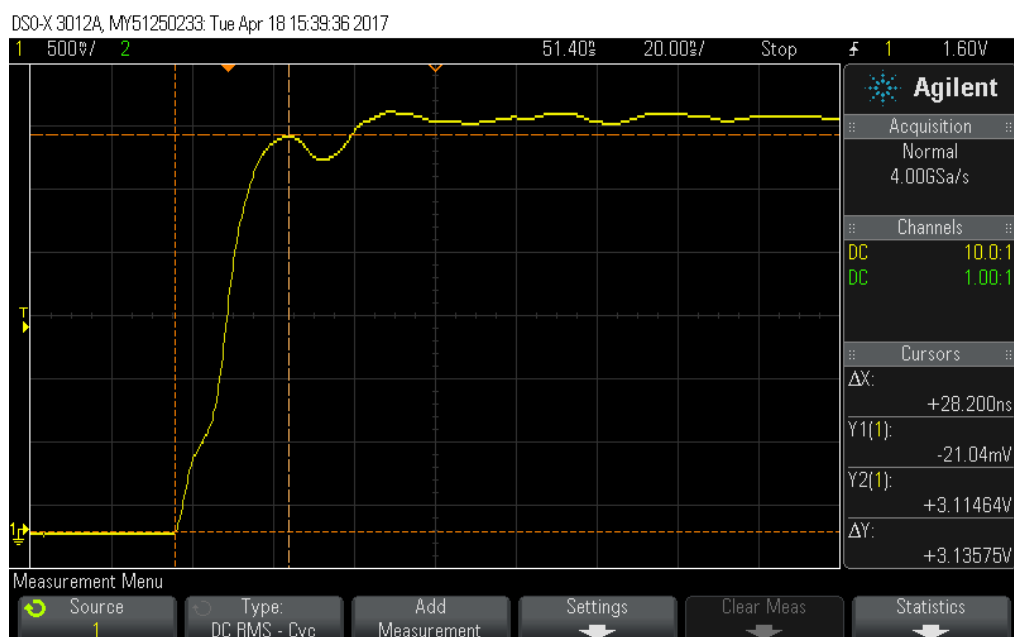
Obr. 3.6: Software pro zpracování a vizualizaci dat - Záložka analýza

4 Charakterizace senzorového systému

Pomocí digitálního osciloskopu Agilent DSO-X-3012A byla ověřena délka měření teploty celého řetězce s 12 senzory a strmost náběžné hrany. Doba převodu při pokojové teplotě 20 °C trvá 1,156 sekund (Obr. 4.1). Strmost hrany je závislá na výstupní kapacitě. Dle katalogového listu odpovídá doba náběhu 28,2 ns zatěžovací kapacitě přibližně 50 pF. (Obr. 4.2).



Obr. 4.1: Výstupní PWM signál senzoru TMP05



Obr. 4.2: Náběžná hrana výstupního signálu senzoru TMP05

V rámci experimentu proběhla kalibrace a měření dynamické odezvy na čtveřici prstů osazených flexibilními plošnými spoji se senzory TMP05, které byly následně zapouzdřeny zalévací hmotou. Pro každý vzorek zalévací hmoty byly sensorové elementy zapojeny a očíslovány v pořadí boky prstu (11 senzorů) a hřbet prstu (12 senzorů) (Tab. 4.1). Měření byla realizována v termostatické olejové lázni Lauda ProLine PjL12 s průtokovým chladicím modulem Lauda DLK 45 a silikonovým olejem Lauda Kryo 51, který je určen pro pracovní teploty od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Absolutní přesnost kalibrační lázně je $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotní stabilita $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17].

Tab. 4.1: Vzorky zalévacích hmot

Senzor č.	Výrobce	Označení	Barva	Tepelná vodivost [W/(m.K)]	Viskozita [mPa.s]	Doba vytvrzení [hod./ $^{\circ}\text{C}$]	Složení
1 až 23	ACC Silicones	AS1740	Průhledná	0,18	40000	72/23	Jednosložkový silikon
24 až 46	Robnor	EL100F	Červená	-	Pasta	48/24	Dvousložkový polyuretan
47 až 69	ACC Silicones	AS2502	Červená	0,2	Pasta	1/25	Dvousložkový silikon
70 až 92	Veropal	HE 20-08	Jantarová čirá	-	25000	24/23	Dvousložkový epoxid

4.1 Kalibrace senzorů teploty

Kalibrace senzorů teploty se dle standardů provádí v termostatické lázni se silikonovým olejem. Lázeň zajišťuje homogenní rozložení teploty a její přesnou regulaci. Teplota změřená testovanými senzory je porovnávána s teplotou v lázni, či jinou zvolenou referencí. První krok při kalibraci našich senzorů teploty je potlačení jejich offsetu při jmenovité teplotě 25 °C. Dalším krokem je ověření přesnosti měření, které se provádí při schodovitém měřicím profilu. Minimální délka schodu je dána dynamickou odezvou senzoru, dynamikou a zvolenou tolerancí požadované teploty termostatické lázně. Teplotní krok mezi jednotlivými segmenty profilu je zpravidla 10 °C. Čím menší krok, tím preciznějšího zmapování přesnosti lze dosáhnout. Z ustálené části jednotlivých teplotních schodů určíme rozdíl teploty kalibrovaného a referenčního senzoru a sestavíme kalibrační křivku.

Offset pro jednotlivé senzory teploty byl vypočítán dle vzorce 4.1.

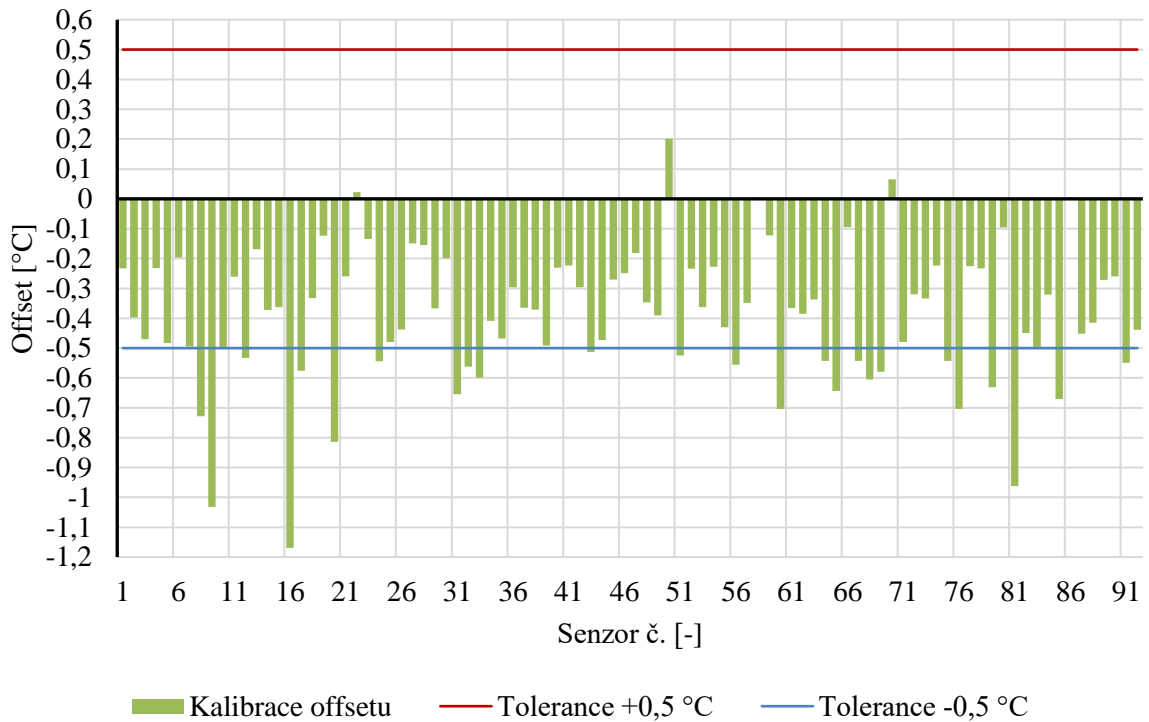
$$T_{offset} = T_{ref} - \frac{\sum_1^N T}{N} \quad (4.1)$$

kde T_{ref} je referenční teplota termostatické lázně (25 °C)

T je teplota naměřená senzorem TMP05

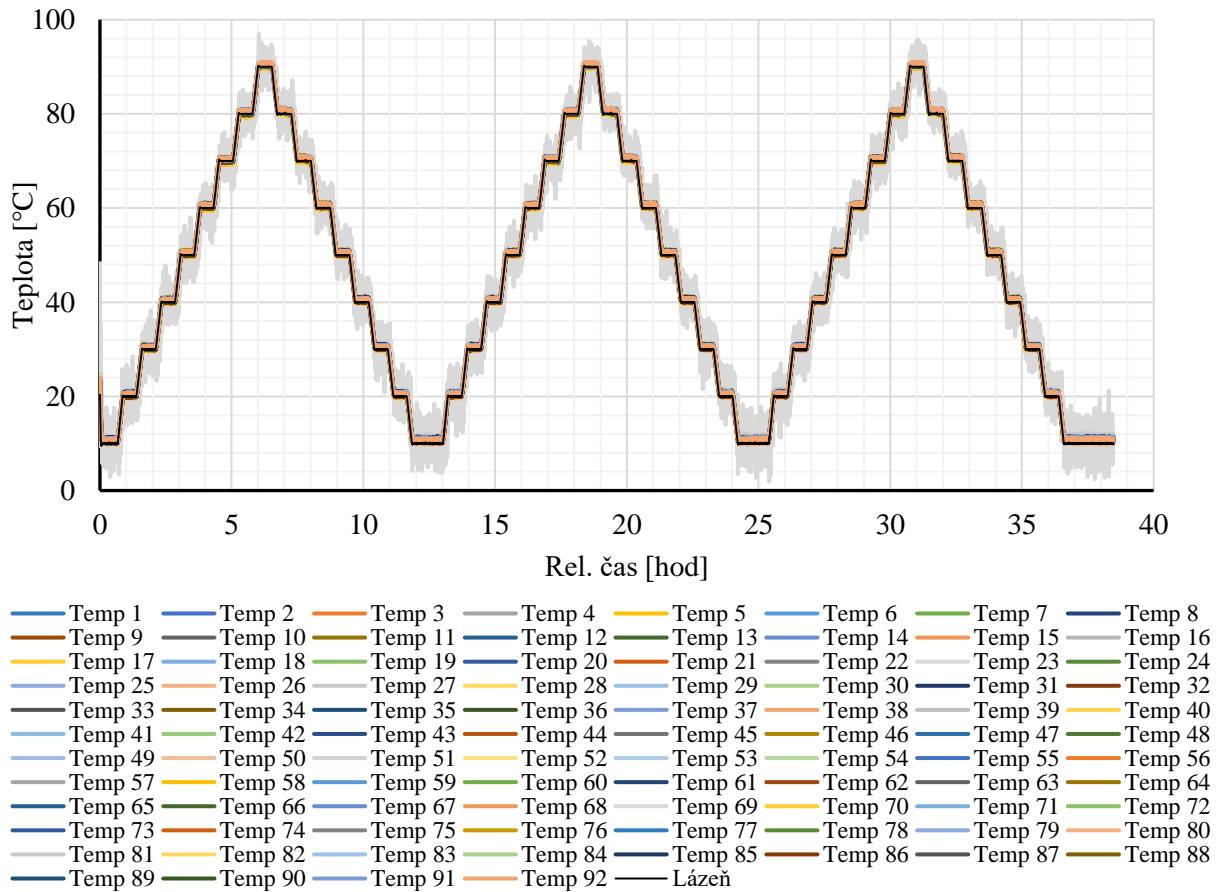
N je počet naměřených vzorků

Minimální chyba offsetu byla 0,004 °C u senzoru č. 58 a maximální -1,169 °C u senzoru č. 16 (Obr. 4.3). Přesně 67 senzorů z celkového počtu 92 bylo v toleranci $\pm 0,5$ °C, která je udávána výrobcem pro teplotu 25 °C. Pouze 3 senzory naměřily v průměru teplotu nižší než 25 °C a byl jim tedy přiřazen kladný offset.

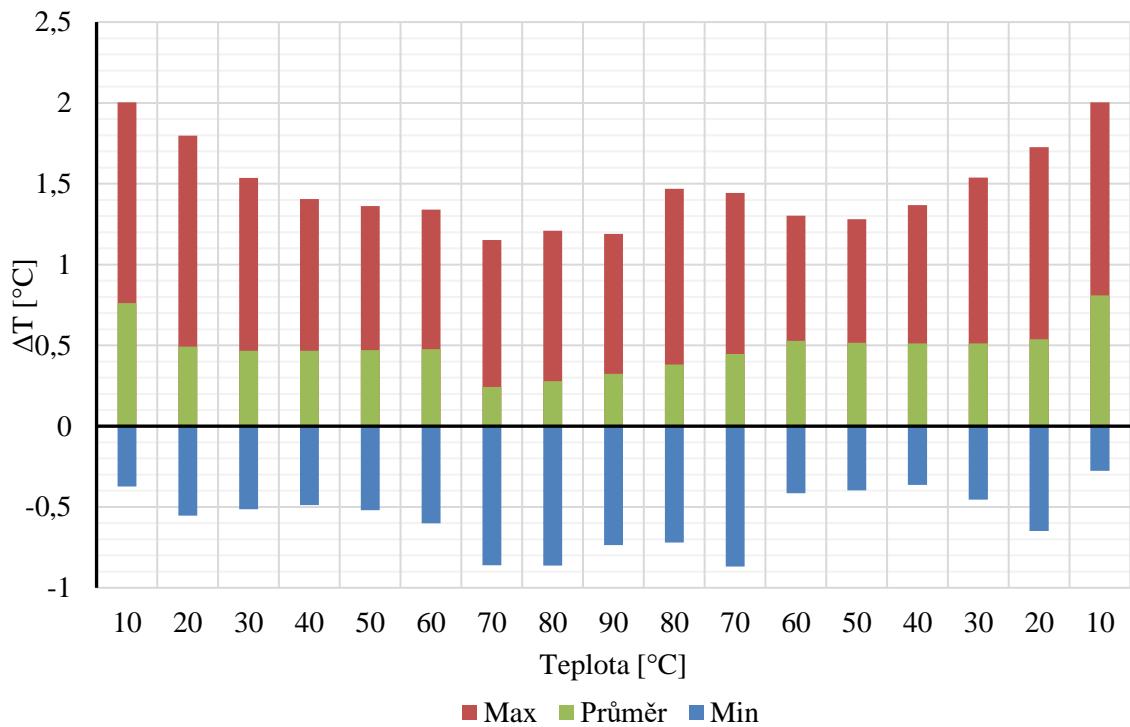


Obr. 4.3: Kalibrace offsetu při jmenovité teplotě 25 °C

Schodovitý měřicí profil pro ověření přesnosti měření se pohyboval od 10 °C do 90 °C s krokem 10 °C (Obr. 4.4). Senzor č. 23 a č. 69 během měření kmital v rozsahu přibližně ± 6 °C, z toho důvodu nebyly tyto senzory zahrnuty do vyhodnocení. Chyba měření TMP05 byla v rozsahu -0,87 °C až + 2,0 °C. Průměrná chyba se pro teploty nad 10 °C pohybuje kolem + 0,5 °C (Obr. 4.5). Tento fakt může být částečně potlačen re-kalibrací systému. Maximální a průměrná chyba měření se snižující se teplotou roste. Příčinou může být nastavení před-děličky čítače, která je uzpůsobena tak, aby čítač při maximální možné délce pulzu nepřetekl. Délka pulzu klesá společně s teplotou, tím pádem se chyba způsobená minimálním rozlišením čítače pro nižší teploty projevuje více. Zmíněnou chybu lze potlačit akceptováním přetečení čítače a uchováváním značek o přetečení.



Obr. 4.4: Kalibrační schodovitý profil pro měření přesnosti TMP05 při teplotě 10 až 90 °C



Obr. 4.5: Přesnost senzorů TMP05 při schodovitém profilu s teplotou od 10 do 90 °C

Cyklování se do značné míry projevilo na silikonových zalévacích hmotách od firmy ACC Silicones. Silikon zvětšil svůj objem a dostal se mimo zalévací drážky. Není jisté, do jaké míry je to způsobeno teplotním namáháním, nebo případnou reakcí se silikonovým médiem termostatické olejové lázně. Z výsledků lze minimálně usoudit, že silikonové zalévací hmoty nejsou vhodné pro standardní testování v termostatické olejové lázni. Měření se naopak žádným způsobem neprojevilo na polyuretanové pastě EL100F. Nízko-viskózní epoxid Veropal HE20-08 na pár místech popraskal a změnil odstín, to může mít na svědomí také nedostatečné vytvrzení materiálu (Obr. 4.6).

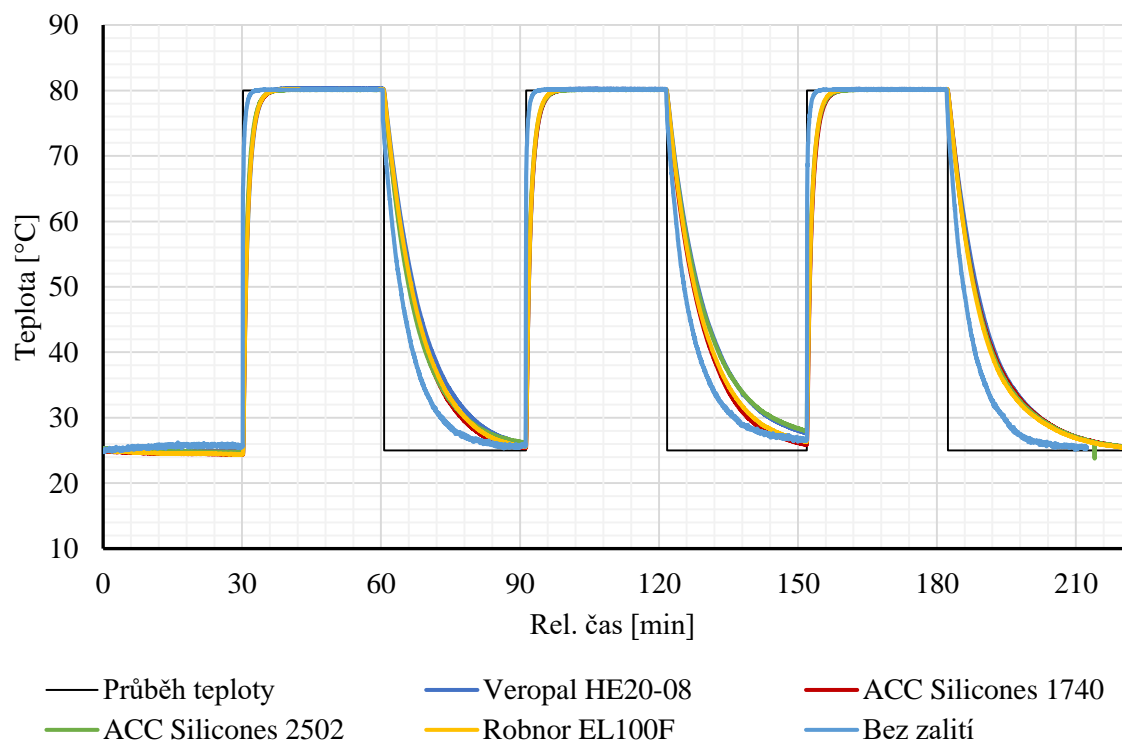


Obr. 4.6: Degradace silikonových zalévacích hmot po cyklickém měření v termostatické olejové lázni

4.2 Dynamická odezva senzorů teploty

Dynamická odezva senzorů teploty je definována jako doba, za kterou teplota dosáhne 63,2 % rozdílu teploty, což odpovídá době τ . Je zřejmé, že tato doba je závislá na rozdílu počáteční a koncové teploty. Čím větší rozdíl počáteční a koncové teploty, tím delší doba odezvy. Měření je standardně prováděno při přechodu testovaného zařízení ze vzduchu proudícího rychlostí 3 m/s o teplotě 20 °C do vody proudící rychlostí 1 m/s o teplotě 80 °C.

Dynamické parametry byly měřeny ve při přechodu sensorového systému ze vzduchu o pokojové teplotě 25 °C do termostatické lázně o teplotě 80 °C a zpět. Doba τ při změně teploty z 25 na 80 °C odpovídá době, kdy teplota dosáhne 59,8 °C, při změně teploty z 80 na 25 °C odpovídá době, kdy teplota klesne na 45,2 °C. Sensory byly umístěny v drážkách a kompletně překryty zalévací hmotou. Na základě výsledků měření je zřejmé, že zalévací hmota má výrazný vliv na dynamické vlastnosti systému (Obr. 4.7). Nejlepší dynamické vlastnosti má hmota ACC Silicones AS2502 s dobou náběhu průměrně 55 s. Nejrychleji klesá teplota u ACC Silicones AS1740, a to přibližně 437 s. I přesto se jedná o doby mnohem delší než v případě nezalitého sensorového elementu. Nejnepříznivější dobu nárůstu (62 s) a poklesu (491 s) má dvousložkový epoxid Veropal HE20-08 (Tab. 4.2). Změna teploty z počáteční teploty 25 °C až na plnou koncovou teplotu 80 °C trvá přibližně 5 minut, pokles zpět 25 °C celých 30 minut.

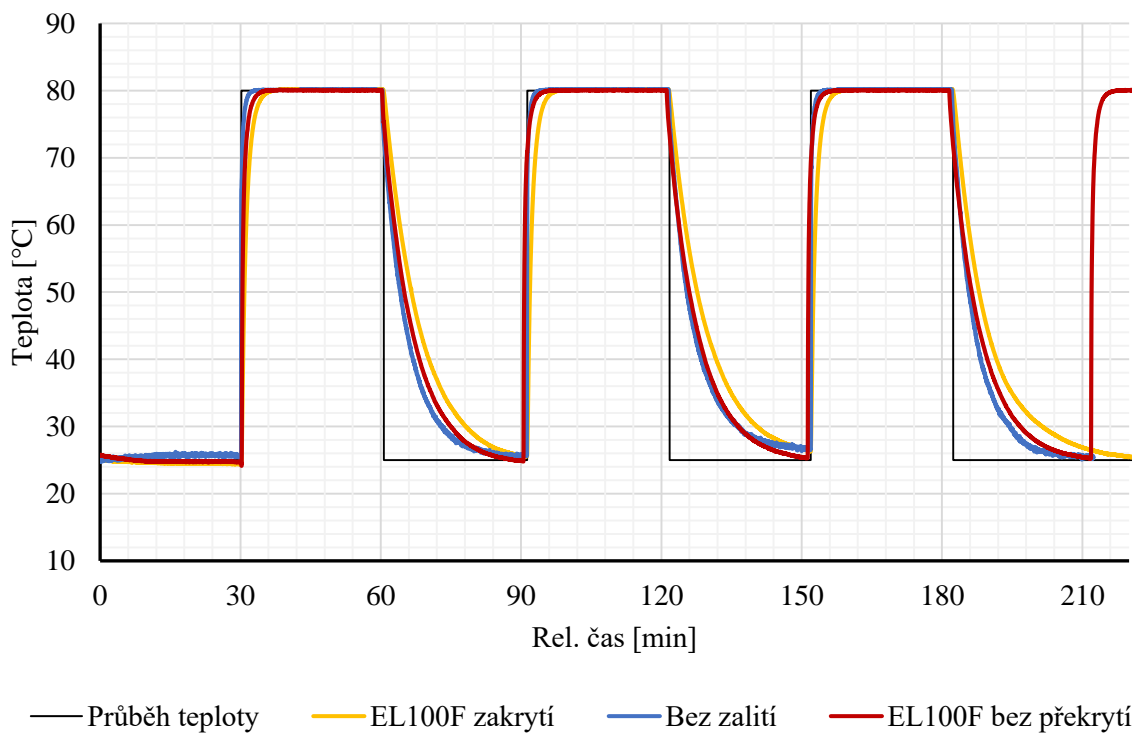


Obr. 4.7: Porovnání dynamických vlastností pro jednotlivé zalévací hmoty při skokové změně teploty z 25 na 80 °C a zpět

Tab. 4.2: Dynamická odezva senzorů pro různé zalévací hmoty při skokové změně teploty z 25 na 80 °C a zpět

Výplň drážek	t_{R1} [s]	t_{F1} [s]	t_{R2} [s]	t_{F2} [s]	t_{R3} [s]	t_{F3} [s]
Bez zalévací hmoty	2	255	4	273	2	260
ACC Silicones AS1740	59	422	60	442	63	448
Robnor EL100F	62	450	60	456	59	426
ACC Silicones AS2502	54	412	55	506	56	438
Veropal HE20-08	64	485	61	516	61	472

V druhé iteraci měření dynamické odezvy byl flexibilní plošný spoj podložen epoxidovou modelovací hmotou tak, aby senzory byly v rovině s povrchem prstu a nebyl kompletně překryt zalévací hmotou. K vyplnění drážek byl použit polyuretan EL100F, který při cyklování nejméně degradoval. Ve srovnání s plným překrytím a odhaleným povrchem senzoru je znatelný rozdíl (Obr. 4.8) a (Tab. 4.3).



Obr. 4.8: Porovnání dynamických vlastností pro polyuretanovou hmotu při různém umístění senzorů a skokové změně teploty z 25 na 80 °C a zpět

Tab. 4.3: Dynamická odezva senzorů pro polyuretanovou zalévací hmotu při různém umístění senzorů a skokové změně teploty z 25 na 80 °C a zpět

Výplň drážek	t_{R1} [s]	t_{F1} [s]	t_{R2} [s]	t_{F2} [s]	t_{R3} [s]	t_{F3} [s]
Bez zalévací hmoty	2	255	4	273	2	260
Zarovnání s povrchem	20	366	18	372	17	368
Kompletní překrytí	62	450	60	456	59	426

Na základě výsledků experimentů je znatelný vliv zakrytí senzorů zalévací hmotou a tím ovlivnění dynamické odezvy senzorů. Je důležité, v případě použití systému se zalévacími hmotami, v další fázi vývoje zmenšit rozměry drážek a zajistit, aby rovina povrchu senzoru byla ve všech místech shodná s rovinou modelu, případně každý senzor lokálně zalít vysoce teplo-vodivou pastou a zbytek drážky naopak hmotou s nízkou tepelnou vodivostí. Zalévací hmoty však vyžadují ruční práci a úpravu povrchu. Řešením s velkou opakovatelností by byl systém s drážkami a jejich protikusy vytisknutými, stejně jako samotný model, na 3D tiskárně. Protikus, resp. vyříznutá část drážky by měla otvory pro senzory a byla by fixována lepidlem. S tímto řešením navíc částečně odpadá nutnost zarovnání senzorů s povrchem ruky. Dále je patrná značná tepelná akumuláční schopnost modelu prstu, která se projevuje zejména při poklesu teploty. V případě kompletního modelu ruky lze předpokládat daleko větší tepelnou setrvačnost, proti čemuž by měla působit regulace vnitřního oběhu kapaliny simulující krevní oběh s konstantní teplotou.

Závěr

Tato práce v úvodní kapitole shrnuje přehled dotykových a bezdotykových metod měření teploty. V další části je věnována pozornost vybraným teplotním senzorům a následně realizaci hardwaru a softwaru pro měření a vizualizaci dat. Závěrečná část práce se poté zaměřuje na charakterizaci senzorového systému.

Celkem byly zvažovány tři typy senzorů teploty, přičemž jako optimální volba byl vybrán senzor TMP05 v zřetěženém zapojení. Ten umožňuje měření teploty na více jak dvou stovkách míst v rámci jednotek sekund.

Senzory byly umístěny do drážek na modelu lidské ruky, který byl vyroben pomocí 3D tisku z polyamidu. Drážky byly vyplněny zalévacími hmotami na bázi silikonu, epoxidu a polyuretanu. V rámci testování byla provedena kalibrace celého systému, ověřena přesnost měření a dynamická odezva teploty.

Z výsledků dosažených při charakterizaci senzorového systému vyplývá, že dynamická odezva je výrazně ovlivněna zakrytím senzorů zalévací hmotou. Přesnost měření se průměrně pohybuje v rozsahu $\pm 0,5$ °C.

Ke zlepšení parametrů systému by měla být v rámci dalšího vývoje zmenšena hloubka a šířka drážek pro flexibilní plošné spoje včetně jejich tvaru kopírující povrch modelu. Menší průměr kabelů umožní jejich snazší zapracování do povrchu modelu a větší volnost realizace. Zalévání s využitím tepelných můstků nebo odkrytí senzorů povede ke zlepšení dynamických vlastností. Nicméně z již dosažených výsledků vyplývá, že zvolený způsob měření a vizualizace je pro danou aplikaci použitelný a umožňuje poměrně rychlé a snadné vyhodnocení dat.

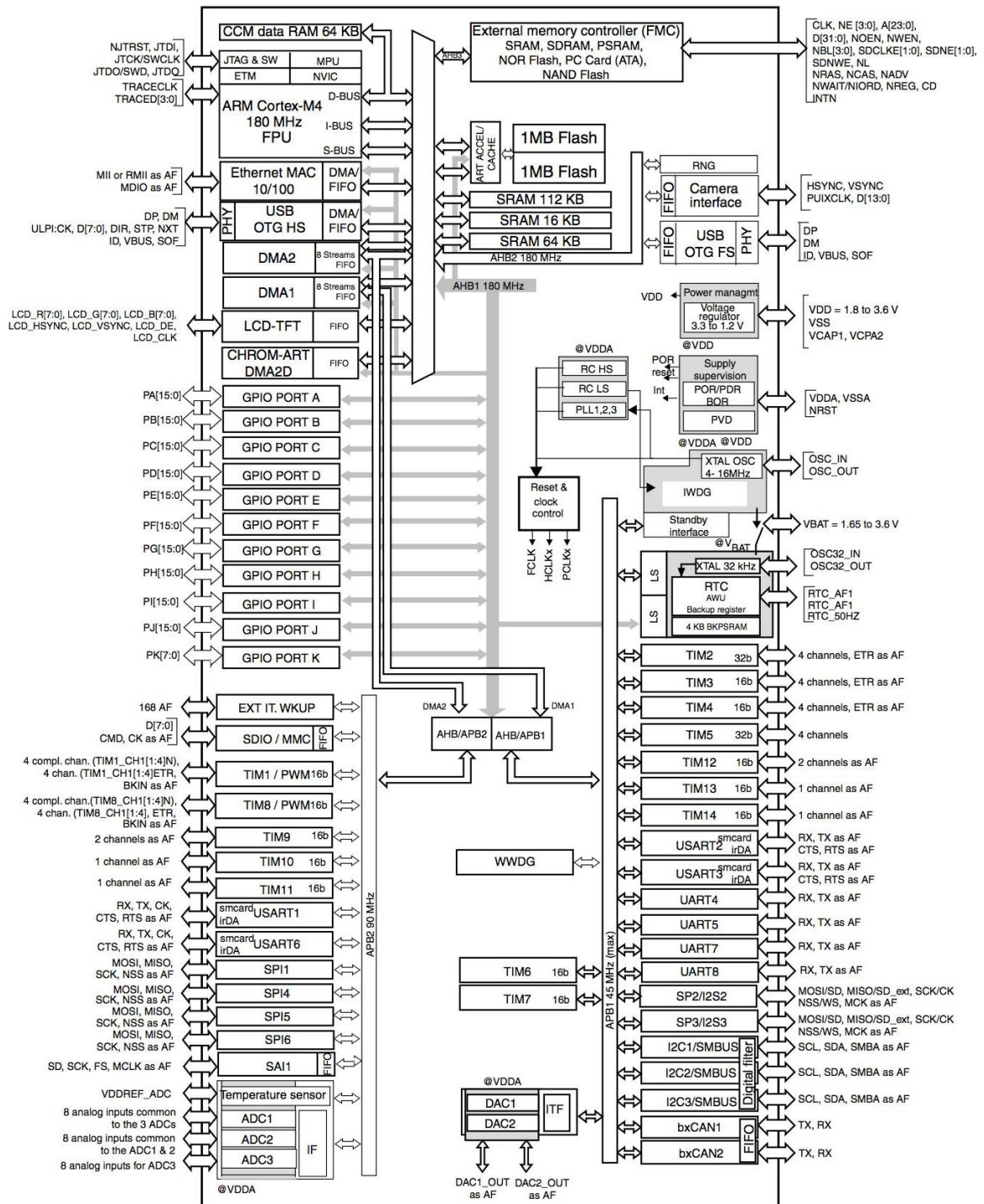
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ĎAĎO, Stanislav a KREIDL, Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [2] ACROMAG. *Criteria for temperature sensor selection of T/C and RTD sensor types: The Basics of Temperature Measurement Using RTDs* [online]. 2011, , 22 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: http://www.acromag.com/sites/default/files/RTD_Temperature_Measurement_917A.pdf
- [3] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [4] VISHAY BCCOMPONENTS. *NTC Thermistors: Application Note* [online]. 2012, 10 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/29053/ntcintro.pdf>
- [5] KADLEC, Karel a KMÍNEK, Miloš. *MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA* [online]. 2. vyd. Praha: VŠCHT, 2005 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/>
- [6] HRUŠKA, František. *SENZORY: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití* [online]. 2. vyd. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010 [cit. 2016-10-10]. ISBN 978-80-7454-096-7. Dostupné z: www.utb.cz/file/15534_1_1/
- [7] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [8] BARRON, W. R. Principles of Infrared Thermometry. *Sensors Magazine* [online]. , 4 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z059-062.pdf>
- [9] SCHILZ, Jürgen. *THERMOELECTRIC INFRARED SENSORS (THERMOPILES) FOR REMOTE TEMPERATURE MEASUREMENTS; PYROMETRY* [online]. In: . Wiesbaden, Germany: PerkinElmer Optoelectronics GmbH, 2000 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <https://www.tuhh.de/mt/ftir/lib/RemoteTemperature/pyrometry.pdf>

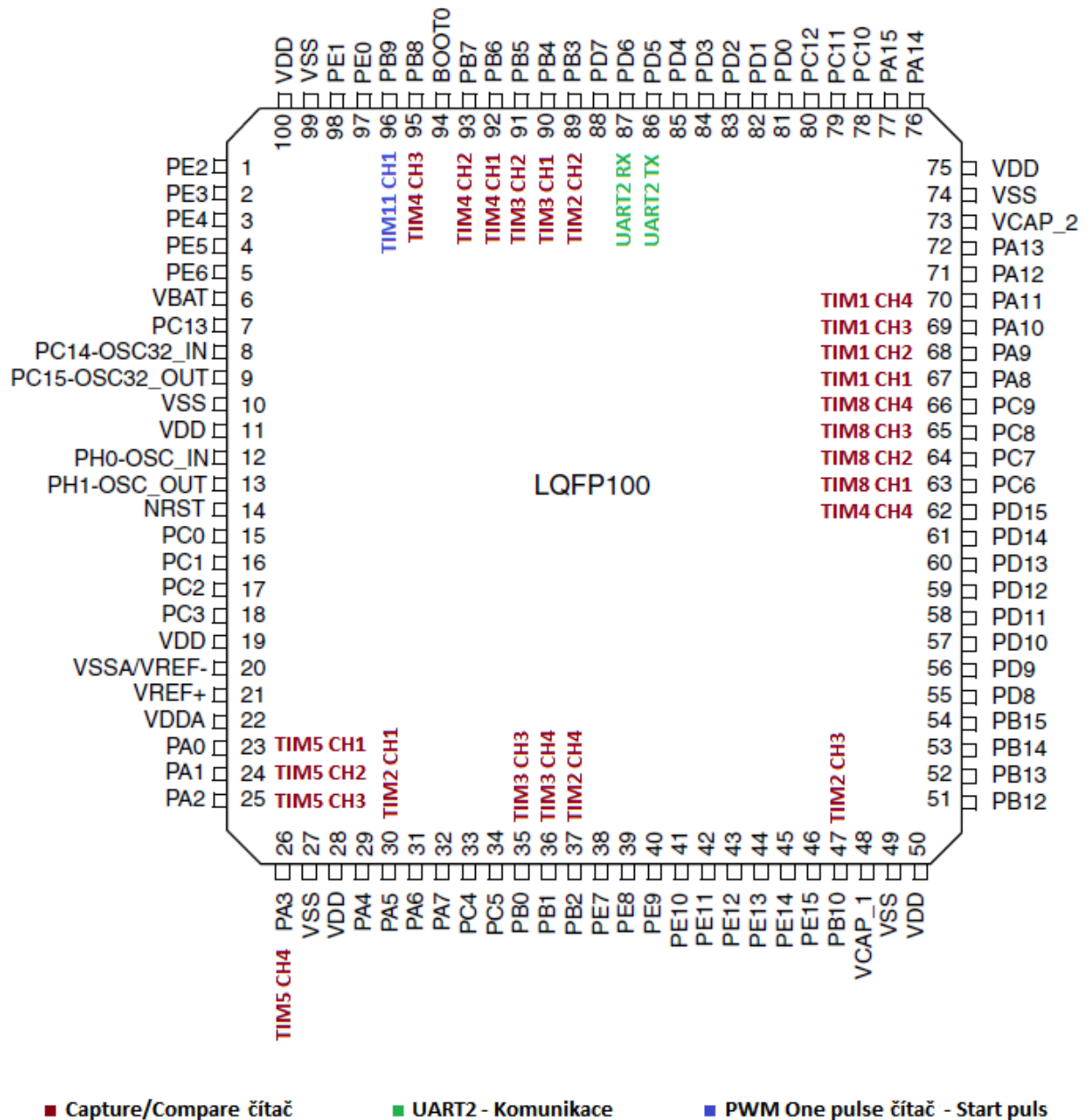
- [10] DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. In: *Maxim integrated* [online]. Maxim Integrated Products, Inc, 2015 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [11] 1-Wire Search Algorithm: Application note. In: *Maxim integrated* [online]. Maxim Integrated Products, Inc, 2002 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN187.pdf>
- [12] *TMP107 Digital Temperature Sensor with Bidirectional UART One-Wire Interface and EEPROM* [online]. In: . Texas Instruments, 2015, s. 40 [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp107.pdf>
- [13] *Easy-to-use Cabling Interface for Measuring Temperature with the TMP107* [online]. In: . Texas Instruments, 2015, s. 14 [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sboa138a/sboa138a.pdf>
- [14] *TMP05/TMP06: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accurate PWM Temperature Sensor in 5-Lead SC-70* [online]. In: . Analog Devices, Inc., 2012, s. 28 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMP05_06.pdf
- [15] *STM32F446xC/E* [online]. In: . STMicroelectronics, 2016, s. 202 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: http://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-f446re.pdf
- [16] ŽÍDEK, Jan. *Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW: Výuková skripta* [online]. Ostrava, 2002, , 215 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: autnt.fme.vutbr.cz/lab/FAQ/labview/VI_Skripta.pdf
- [17] *Operating instructions: Proline heating thermostats* [online]. In: . Lauda-Königshofen Germany: LAUDA DR. R. WOBSE GMBH & CO., 2016, s. 131 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.lauda.de/fileadmin/downloads/YACE0071_b3_Proline%20Waerme_2016-08-02_CR1000401-379.pdf

Přílohy

Příloha A - Mikroprocesor STM32F446RE



Ob. A.1: Blokové schéma mikroprocesoru MCU STM32F446RE



Obr. A.2: Pouzdro MCU STM32F446RE - obsazení pinů

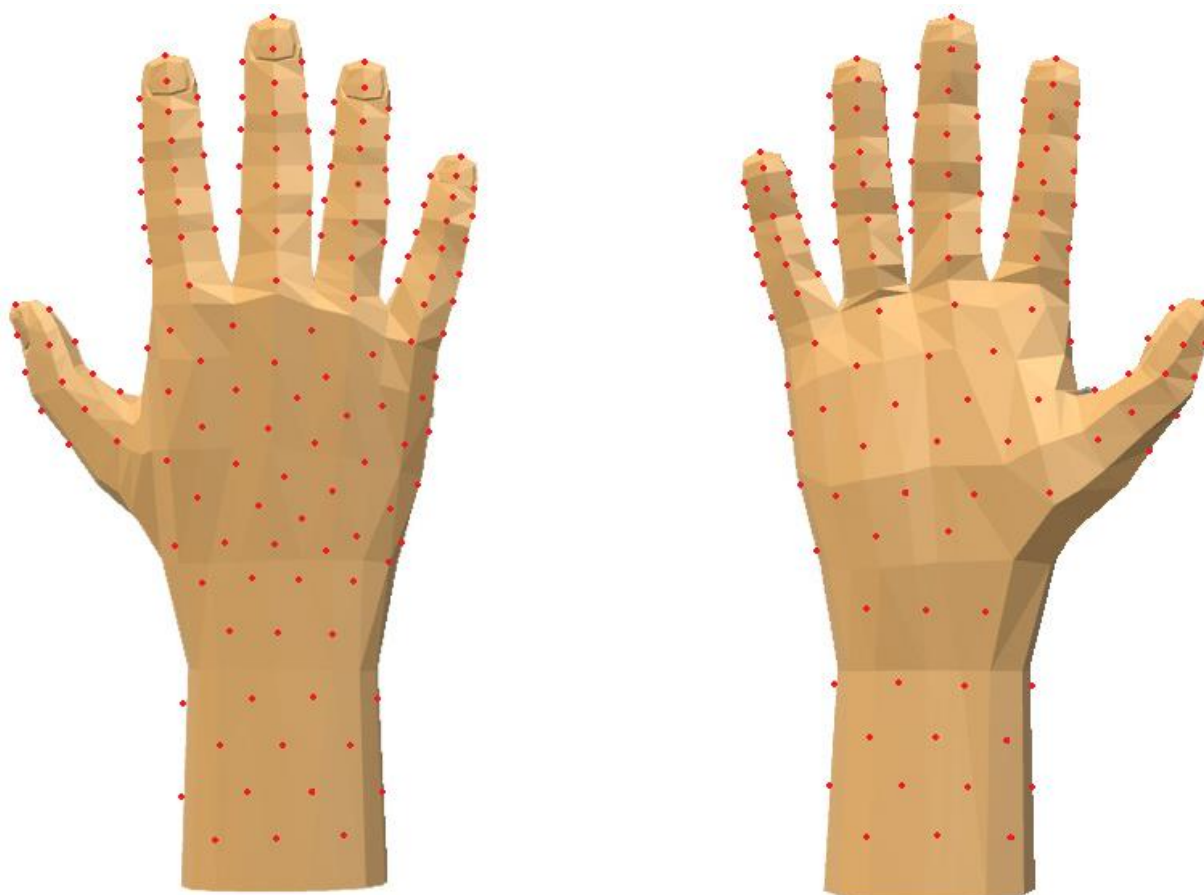
V blokovém schématu mikroprocesoru STM32F446RE (Obr. A1) jsou vidět dostupné periférie včetně Čítačů (Timerů) a síť sběrnic, ke kterým jsou připojeny. Většina čítačů je připojena ke sběrnici APB1 s maximální rychlostí 45 MHz.

Vyznačení použitých pinů mikroprocesoru STM32F446RE (Obr A2). Červenou barvou jsou vyznačeny capture/compare čítače a jejich kanály. Zelená označuje dvojici signálů Rx a Tx UART komunikace. Startovací pulz měření je vysílán čítačem v konfiguraci jednopulzního PWM čítače označeného modrou barvou.

Příloha B – Model lidské ruky a rozmístění senzorů

Obr. B.1: Keramický model ruky pro výrobu gumových rukavic

Keramický model ruky pro výrobu chirurgických gumových rukavic od firmy CeramTec typ 498 velikost 9. Model je využíván k výrobě rukavic technikou ponoru. Pomocí 3D skeneru bude povrch tohoto modelu přenesen do počítačové podoby, opatřen drážkami pro senzory a kabeláž, vnitřním rozvodem kapaliny a opět vytisknut na 3D tiskárně.



Obr. B.2: Přepokládané rozmístění senzorů teploty

Příloha C – Zalévací hmoty

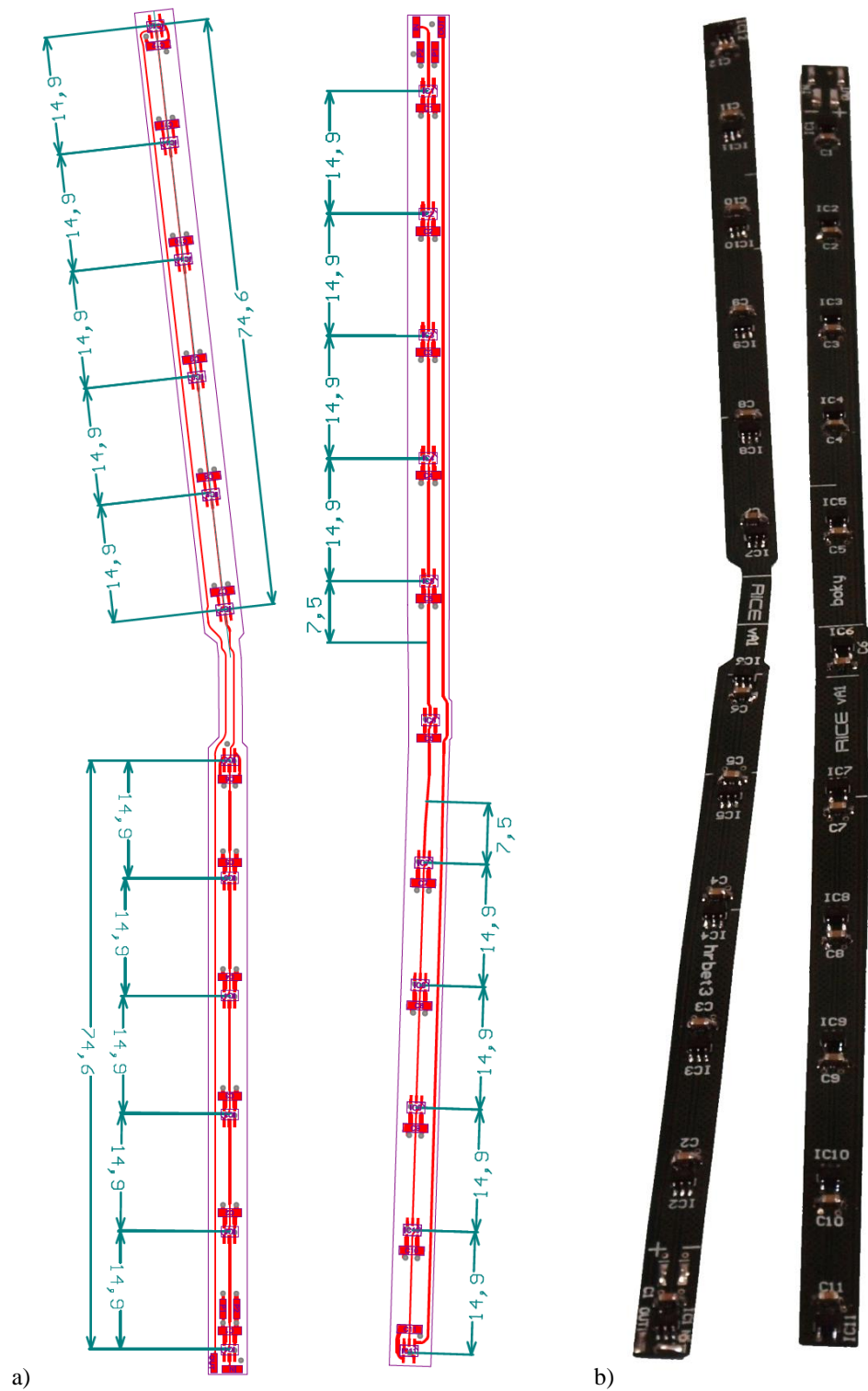
Tab. C.1: Výběr zalévacích hmot

Výrobce	Označení	Barva	Tepelná vodivost [W/(m.K)]	Viskozita [mPa.s]	Doba vytvrzení [hod./°C]	Složení
Dow Corning	DC3140	Transparentní	0,12	35950	72/23	Jednosložkový silikon
Dow Corning	Sylgard 184	Transparentní	0,146	5500	48/23	Dvousložkový silikon
Huntsman	Araldite MY 740 Araldite HY 906	Jantarová čirá	0,15	1600	30/110	Dvousložkový epoxid
3M	Scotchcast Electrical Resin 250	Jantarová čirá	0,15	1800	16/75	Dvousložková epoxid
3M	Scotchcast Electrical Resin 3	Jantarová čirá	0,17	1600	16/77	Dvousložkový epoxid
Dow Corning	DC3145	Transparentní šedá	0,17	34400	48/23	Jednosložkový silikon
3M	Scotchcast Electrical Resin 8	Jantarová čirá	0,18	7000	48/23	Dvousložkový epoxid
ACC Silicones	AS1740	Poloprůhledná	0,18	40000	72/23	Jednosložkový silikon
Arathane	XW 949-1 POLYOL BLUE a HY 5610	Modrá	0,19	1800	24/25	Dvousložkový polyuretan
Dow Corning	3-6121	Poloprůhledná	0,19	19250	48/23	Dvousložkový silikon
Epoxies	20-3035	Poloprůhledná	0,19	25000	24/25	Dvousložkový epoxid
ELCHEMCo	PU431 - PH30	Poloprůhledná	0,2	1250	48/25	Dvousložkový polyuretan
Electrolube	ER1122	Jantarová čirá	0,2	12000	48/23	Dvousložkový epoxid
Robnor	EL500F	Jantarová čirá	0,2	Pasta	6/24	Dvousložkový polyuretan
ACC Silicones	AS2502	Červená	0,2	Pasta	1/25	Dvousložkový silikon
ACC Silicones	AS1805	Červená	0,2	Pasta	8/25	Jednosložkový silikon
Dow Corning	Sylgard 186	Poloprůhledná	0,21	66700	48/23	Dvousložkový silikon
Cytec	Easypoxy 45	Poloprůhledná	0,21	Pasta	24/25	Dvousložkový epoxid

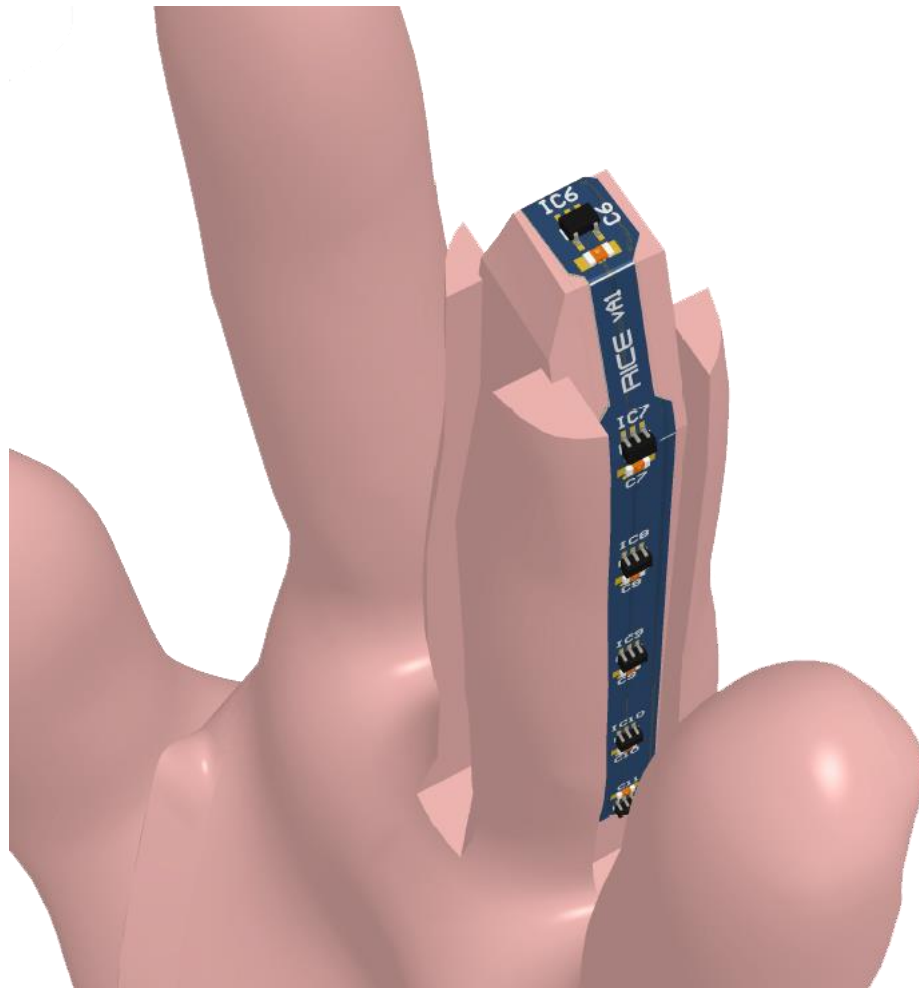
Výrobce	Označení	Barva	Tepelná vodivost [W/(m.K)]	Viskozita [mPa.s]	Doba vytvrzení [hod./°C]	Složení
Cytec	Easypoxy 22	Černá	0,24	Pasta	24/25	Dvousložkový epoxid
Electrolube	UR5528	Černá	0,25	2000	24/23	Dvousložkový polyuretan
Electrolube	UR5041	Černá	0,25	2500	24/23	Dvousložkový polyuretan
Robnor	PX774D	Černá	0,25	Pasta	16/20	Dvousložkový epoxid
MG Chemicals	832HT	Černá	0,27	22000	24/22	Dvousložkový epoxid
3M	Scotchcast Liquid Resin 252	Červeno-hnědá	0,29	Pasta	20/75	Dvousložkový epoxid
Robnor	EL420AT	Poloprůhledná	0,3	Pasta	24/25	Dvousložkový polyuretan
3M	Scotchcast Liquid Resin 253	Červeno-hnědá	0,33	Pasta	24/75	Dvousložkový epoxid
3M	Scotchcast Liquid Resin 10	Hnědá	0,34	Pasta	48/23	Dvousložkový epoxid
3M	Scotchcast Liquid Resin 282	Krémová bílá	0,5	Pasta	20/82	Dvousložkový epoxid
Veropal	HE 20-08	Jantarová čirá	-	25000	24/23	Dvousložkový epoxid
Elchemco	MC155/W500	Černá	-	Pasta	48/24	Dvousložkový epoxid
Robnor	EL100F	Červená	-	Pasta	48/24	Dvousložkový polyuretan

Tabulka zalévacích hmot s nízkou tepelnou vodivostí. Převažují dvousložkové silikonové a epoxidové zalévací hmoty. Nejnižší tepelnou vodivostí a vysokou pružností se vyznačuje materiál na bázi silikonu. Pružnost povrchu však omezuje dodatečné povrchové úpravy např. broušením. Pastovitá viskozita hmoty je preferována vzhledem k minimalizaci počtu kroků zalévání, nevytváří však samovolně planární povrch a je nutné jej vytvarovat pomocí stěrky.

Příloha D – Návrh flexibilních plošných spojů



Obr. D.1: a) Design plošného spoje, b) Osazené elementy (vlevo hřbet, vpravo boky prsu)



Obr. D.2: 3D model včetně plošného spoje

Conductor Impedance

Conductor Width (W) mm

Conductor Height (H) mm

Conductor Gap (G) mm

W/H = 2.000

Formula Restrictions:
 $0.1 < W/H < 2.0$
T = 53um

Options

Base Copper Weight

- 9um
- 18um
- 35um
- 53um
- 70um
- 88um
- 106um
- 142um
- 178um

Plating Thickness

- Bare PCB
- 18um
- 35um
- 53um
- 70um
- 88um
- 106um

Passive Circuits

- Microstrip
- Microstrip Embed
- Stripline
- Stripline Asym
- Dual Stripline
- Coplanar Wave

Units

- Imperial
- Metric

Substrate Options

Material Selection:

Er: Tg (°C):

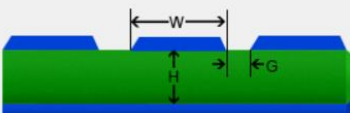
Temp Rise (°C):

Temp in (°F) = 36.0

Ambient Temp (°C):

Temp in (°F) = 71.6

Zo:



The diagram shows a cross-section of a coplanar waveguide. It consists of a central blue conductor of width W, flanked by two blue ground planes separated by a gap G. The conductor and ground planes are on a green substrate of height H. The conductor is centered on the substrate.

Obr. D.3: Výpočet charakteristické impedance spoje (Saturn PCB toolkit)

Design plošných spojů znázorňující lineární rozložení senzorů teploty (Obr. D.1 a). Horní Top vrstva nese signálové vodiče IN pro zahájení měření a OUT s výstupním PWM signálem nesoucí informaci o teplotě. V spodní Bottom vrstvě je rozlita zem a napájení 3,3V. Plošný spoj (Obr. D.1 b) je v drážce uchycen pomocí vteřinového lepidla v krajních bodech pásku. Kabeláž je připevněna pomocí stahovacích pásků k základně prstu. Při finální realizaci bude kabeláž umístěna v drážkách a fixována lepidlem.

Výpočet charakteristické impedance je velmi podstatný vzhledem k délce spoje s výstupním signálem. Je třeba zamezit odrazům na vedení a příliš velké proudové spotřebě.

Příloha E – Nastavení input capture kanálu a výpočet teploty

Inicializace prvního kanálu TIM4 pro zachytávání náběžných i sestupných hran signálu a výňatek kódu pro výpočet doby trvání T_H a T_L a výpočet teploty dle vzorce 2.1. Hodnota 65535 ve vzorci pro výpočet délky pulzu odpovídá hodnotě TIM4->ARR, neboli maximální hodnotě čítače.

```
void IC_bothedge_initTIM4_CH1(void){

    //Reset periferie
    if (!(RCC->APB1ENR & RCC_APB1ENR_TIM4EN))
    {
        RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM4EN;    // Povolení periferie
        RCC->APB1RSTR |= RCC_APB1RSTR_TIM4RST;
        RCC->APB1RSTR &= ~RCC_APB1RSTR_TIM4RST;
    }

    //Nastavení pinu příslušnému kanálu
    InitIOPort(GPIOB, 6, portTIMIN);
    GPIO_AFConfig(GPIOB, 6, 2);

    TIM4->CCER  &= ~TIM_CCER_CC1E;                // Zakaz zachytavani zmen signalu
    TIM4->DIER  |= TIM_DIER_CC1IE;                // Povoleni interuptu
    TIM4->ARR   = 0xFFFF;                          // Nastaveni maximalni hodnoty citace
    TIM4->CR1   |= TIM_CR1_ARPE;                  // Povoleni preddelicky
    TIM4->PSC   = 0x48;                            // Nastaveni preddlicky
    TIM4->CCMR1 |= TIM_CCMR1_CC1S_0;              // Kanal konfigurovan jako vstup
    TIM4->CCER  |= TIM_CCER_CC1NP;                // Reakce na nabeznou i dobeznou hranu
    TIM4->CCER  |= TIM_CCER_CC1P;                // Reakce na nabeznou i dobeznou hranu
    TIM4->CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_IC1PSC;            // Reakce na kazdou hranu signalu
    TIM4->CCMR1 &= ~TIM_CCMR1_IC1F;              // Zadna zmena frekvence vzorkovani
    TIM4->CCER  |= TIM_CCER_CC1E;                // Povoleni zachytavani zmen signalu
    TIM4->CR1   |= TIM_CR1_CEN;                  // Povoleni citani

    NVIC_EnableIRQ(TIM4_IRQn);                    // Povoleni interuptu NVIC radice
}

for (x=1;x<cislo;x=x+1){

    if (teplota[x]<teplota[x-1]) // Detekce pretecení
    {
        // Vypocet doby mezi prichozimi hranami pri pretecení
        teplota_prepocet[x-1]=65535-teplota[x-1]+teplota[x];
    }
    else{
        // Vypocet doby mezi prichozimi hranami bez pretecení
        teplota_prepocet[x-1]=teplota[x]-teplota[x-1];
    }
    teplota[x-1]=0;
}

for (x=0;x<cislo-1;x=x+2){ // Vypocet teploty dle vzorce z datasheetu
    Vypocet = 421 - (751 * (float)teplota_prepocet[x]/(float)teplota_prepocet[x+1]);
}
```