

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Vavříčkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při vyhodnocování výsledků měření.

ANOTACE

Cílem této bakalářské práce je experimentálně zjistit vliv úhlu pohledu na měření teploty bezkontaktním způsobem. Měřený povrch je dvojího typu. Hladkou plochu reprezentuje deskové otopné těleso typu Radik Klasik 10 – 500x1000 od firmy KORADO, a.s. Nerovný povrch reprezentuje článkové otopné těleso typu Kalor s 10 články od firmy Viadrus, a.s. Vliv úhlu pohledu se zkoumá pro tři nízké teploty (40 °C, 60°C, 80 °C) a pro čtyři vzdálenosti (0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m). K dispozici je pět přístrojů, dva bezkontaktní teploměry a tři termokamery:

- Testo QuickTemp 860-T2 (bezkontaktní teploměr)
- Minolta Land Cyclops Mini View (bezkontaktní teploměr)
- Flir i7 EDU (příruční termokamera)
- Flir S65 (termokamera)
- Flir T460 (termokamera)

K měření jsou využity prostory laboratoře Ústavu techniky prostředí na fakultě strojní, v budově ČVUT v Praze.

Výsledkem této bakalářské práce je vyhodnocení vlivu úhlu pohledu na měření teploty pro každý měřicí přístroj a shrnutí v jakých úhlech je použití přístrojů ještě dostatečně spolehlivé.

SUMMARY

The aim of this thesis is to experimentally determine the influence angle of view the non-contact temperature measurement. Measured surface is twofold. Smooth area represents a panel radiator type Radik Klasik 10 - 500x1000 from KORADO, a. s. Rough surface represents sectional radiator types Kalor 10 articles from Viadrus, a. s. Influence of angle of view is investigated for the three low temperature (40 °C, 60 °C, 80 °C) and for four distance (0,5 m, 1 m, 2 m, 3 m). There are five devices, two non-contact thermometers and three thermal imagers:

- Testo QuickTemp 860-T2 (non-contact thermometer)
- Minolta Land Cyclops Mini View (non-contact thermometer)
- Flir i7 EDU (handheld thermal imager)
- Flir S65 (thermal imager)
- Flir T460 (thermal imager)

Laboratory premises of the Institute of Environmental Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering at the CTU in Prague are used to measure.

The result of this thesis is to evaluate the influence angle of view the temperature measurement for each device and summary of what the angle of view device measure with sufficient reliability.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Bezkontaktní měření teploty“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Romana Vavříčky, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 15. června 2015

Dan Puhl

OBSAH:

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	10
1. ÚVOD.....	11
2. TEORIE	12
2.1. Planckův zákon	12
2.2. Wienův zákon.....	13
2.3. Stefan-Boltzmannův zákon	13
2.4. Složení infračerveného záření	13
2.4.1. Pohltivost (α).....	14
2.4.1. Propustnost (τ).....	14
2.4.1. Odrazivost (ρ).....	14
2.5. Kirchhoffův zákon pro záření	14
2.6. Emisivita (ϵ)	14
2.7. Lambertův zákon.....	15
2.8. Faktory ovlivňující měření bezkontaktními přístroji	16
3. MODERNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ VE SVĚTĚ.....	17
3.1. Experiment Mariusze Litwi.....	17
3.1.1. Popis měření	17
3.1.2. Vyhodnocení experimentu	18
3.2. Experiment Pabla R. Muniz, Shirley P. N. Cani, a Robsona da S. Magalhães	19
3.2.1. Popis experimentu a podmínky měření	19
3.2.2. Vyhodnocení experimentu	20
3.2.3. Poznámka	22
4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	23
4.1. Úkol.....	23
4.2. Popis experimentu.....	23
4.2.1. Měřicí místo	23

4.2.2. Deskové otopné těleso	24
4.2.3. Článekové otopné těleso	25
4.3. Schéma měření	26
4.4. Použité přístroje.....	27
4.4.1. Testo QuickTemp 860-T2	27
4.4.2. Minolta Land Cyclops Mini View.....	27
4.4.3. Flir i7 EDU	29
4.4.4. Flir S65	29
4.4.5. Flir T460.....	30
4.5. Mobilní zdroj tepla.....	31
4.6. Podmínky měření	32
5. PRŮBĚH MĚŘENÍ	33
5.1. Popis měření.....	33
5.2. Popis zpracování naměřených hodnot.....	34
5.3. Práce v programu ThermaCAM Researcher Pro 2.10.....	35
6. VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	37
6.1. Deskové otopné těleso.....	37
6.1.1. Testo QuickTemp 860-T2	37
6.1.2. Minolta Land Cyclops Mini View.....	40
6.1.3. Flir i7 EDU	43
6.1.4. Flir S65	46
6.1.5. Flir T460.....	49
6.2. Článekové otopné těleso	52
6.2.1. Testo QuickTemp 860-T2	52
6.2.2. Minolta Land Cyclops Mini View.....	57
6.2.3. Flir i7 EDU	61
6.2.4. Flir S65	66

6.2.5. Flir T460.....	70
7. VYHODNOCENÍ A DISKUZE.....	75
7.1. Vyhodnocení deskového otopného tělesa	75
7.2. Vyhodnocení článkového otopného tělesa	77
8. ZÁVĚR	79
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK	83
DVD disk	

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

KA		- označení půlkružnice s poloměrem $R_A = 0,5$ m
KB		- označení půlkružnice s poloměrem $R_B = 1$ m
KC		- označení půlkružnice s poloměrem $R_C = 2$ m
KD		- označení půlkružnice s poloměrem $R_D = 3$ m
T	[K]	- absolutní povrchová teplota
c	[m.s ⁻¹]	- rychlost světla ve vakuu
h	[J.s]	- Planckova konstanta
l	[m]	- vzdálenost přístroje od měřeného povrchu
α	[-]	- pohltivost
δ	[%]	- relativní nejistota
ε	[-]	- emisivita
λ	[m]	- vlnová délka vyzařování
ρ	[-]	- odrazivost
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	- Stefan-Boltzmannova konstanta
τ	[-]	- propustnost
φ	[°]	- úhel zářiče, který svírá s normálou k ploše zářiče
ψ	[°]	- úhel naklopení přístroje
I_{ε}	[W.m ⁻²]	- intenzita vyzařování černého tělesa
I_i	[W.m ⁻²]	- intenzita vyzařování reálného tělesa
I_0	[W.m ⁻² .μm ⁻¹]	- intenzita vyzařování
$I_{\varphi,\varepsilon}$	[W.m ⁻²]	- intenzita vyzařování v daném úhlu
R_A	[m]	- poloměr půlkružnice KA , vzdálenost přístroje od snímané plochy
R_B	[m]	- poloměr půlkružnice KB , vzdálenost přístroje od snímané plochy
R_C	[m]	- poloměr půlkružnice KC , vzdálenost přístroje od snímané plochy
R_D	[m]	- poloměr půlkružnice KD , vzdálenost přístroje od snímané plochy
k_B	[J.k ⁻¹]	- Boltzmannova konstanta
t_a	[°C]	- atmosférická teplota
t_g	[°C]	- střední radiační teplota
t_m	[°C]	- naměřená teplota
t_r	[°C]	- zdánlivě odražená teplota
t_{ref}	[°C]	- referenční teplota
λ_{max}	[m]	- maximální vlnová délka vyzařování

1. ÚVOD

Cílem této práce je posouzení, v jakých úhlech pohledu je měření teploty povrchu bezkontaktním způsobem dostatečně spolehlivé při daných podmínkách.

V některých případech v praxi nemáme vždy ideální podmínky. Například omítka budovy, jejíž teplotu chceme znát, není zcela rovná, nebo nejsme schopni postavit měřicí zařízení přesně kolmo k normále měřeného povrchu. Proto této bakalářské práci dávám velkou důležitost. Pomocí výsledků této práce bude moct obsluha měřicího zařízení zjistit, v jakých úhlech odklonu od normály snímaného povrchu je relativní chyba měření menší než celková relativní chyba přístroje.

V úvodních kapitolách je pojednáváno o principech bezdotykového měření teploty. Jsou zde shrnuty dva experimenty, které řeší stejnou nebo podobnou problematiku. Dále práce obsahuje popis měřicího místa a měřících přístrojů. Je zde podrobně rozepsán postup při měření, popis zpracování naměřených hodnot a práce v programu ThermaCAM Researcher Pro 2.10. Největší část práce tvoří výsledky měření, jejichž nedílnou součástí jsou grafy, ze kterých vychází vyhodnocení. Většina teoretických informací se opírá o [L1].

2. TEORIE

Objekty, které měříme termokamerami nebo bezdotykovými teploměry vysílají elektromagnetické záření (sálání). Podmínkou sálání je vyšší teplota, než je teplota absolutní nuly ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$). Elektromagnetické záření se skládá z více oblastí, jejichž rozsahy určuje vlnová délka. Nás zajímá oblast infračerveného záření. Jeho rozsah je $0,75 \text{ } \mu\text{m}$ až 1 mm a také se nazývá tepelné záření. ^[L1]

2.1. Planckův zákon

„Planckův vyzařovací zákon se týká spektrální měrné zářivosti, což je výkon generovaný z jednotky plochy povrchu zdroje na dané vlnové délce, do jednotkového prostorového úhlu. Pro ideální zdroj (tj. absolutně černé těleso) při absolutní teplotě zdroje [K] lze tento zákon napsat v energetickém tvaru

$$I_0(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \left[e^{\left(\frac{c \cdot h}{k_B \cdot \lambda \cdot T} \right)} - 1 \right]^{-1} \quad (1),$$

kde

I_0 - celkový zářivý výkon [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$],

λ - vlnová délka vyzařování [m],

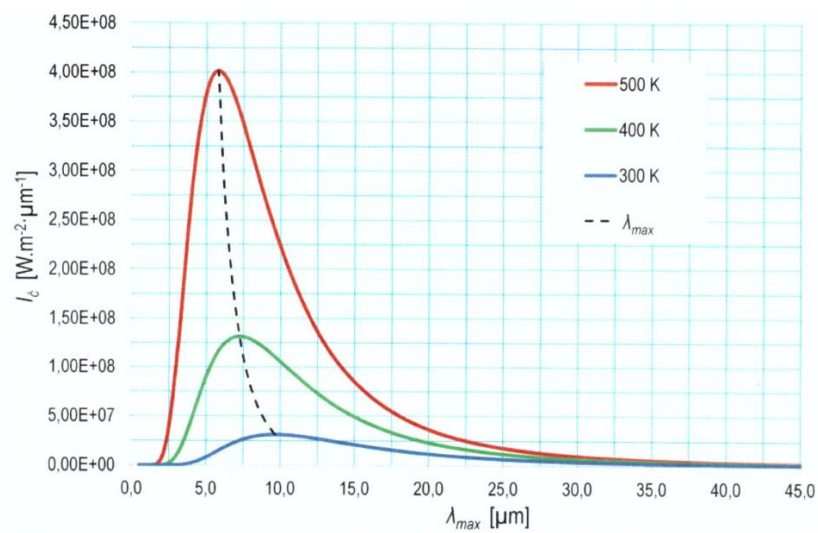
c - rychlost světla ve vakuu ($c = 2,9979 \cdot 10^8$) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

h - Planckova konstanta ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$) [J·s],

k_B - Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$) [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$],

T - absolutní povrchová teplota zdroje [K].” [citováno z [L1] str. 11-12]

Grafické zobrazení Planckova zákona je na obr. 2.1.



obr. 2.1. – Spektrální křivky vyzařování pro absolutně černé těleso o různé teplotě [L1]

2.2. Wienův zákon

„Wilhelm Wien prokázal, že maximum spektrální intenzity vyzařování $I_{\xi}(\lambda, T)$ se mění v závislosti na teplotě absolutně černého tělesa. Odpovídající vlnovou délku lze pak snadno stanovit z Planckova vyzařovacího zákona pro energetické vyjádření vyhledáním lokálního extrému odpovídající funkci

$$\frac{\partial I_{\xi}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{max} \cdot T = 2898 \quad (2).$$

V podstatě Wienův zákon matematicky vyjadřuje, že při růstu teploty zářiče se barvy mění od červené k oranžové či žluté, tedy ke kratším vlnovým délkám. Vlnová délka barvy je stejná jako vlnová délka vypočítaná pro λ_{max} .“ [citováno z [L1] str. 12]
Vizuální prezentace Wienova zákona je na obr. 2.1.

2.3. Stefan-Boltzmannův zákon

„Pokud bychom chtěli z Planckova zákona (1) vyjádřit celkový zářivý výkon absolutně černého tělesa na všech vlnových délkách při dané teplotě a nezávisle na směru vyzařování, lze integrací vzorce (1) nalézt řešení ve tvaru

$$I_{\xi}(T) = \int_0^{\infty} I_{\xi}(\lambda, T) \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \pi \cdot I_0(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k_B^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4 \quad (3),$$

kde

I_{ξ} - celkový zářivý výkon [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

Tento Stefan-Boltzmannův vzorec (podle Josefa Stefana a Ludwiga Boltzmannova) tedy říká, že výsledný vyzařovaný výkon černého tělesa je úměrný čtvrté mocnině jeho absolutní teploty. Integrací Planckova zákona v intervalu vlnových délek kratších a delších nežli je λ_{max} navíc zjistíme, že celkově jen 25 % zářivé energie je generováno na kratších vlnových délkách, nežli je λ_{max} , a 75 % na vlnových délkách delších nežli je λ_{max} (viz obr. 2.1).“ [citováno z [L1] str. 12]

2.4. Složení infračerveného záření

Dlouhovlnné infračervené záření, které jsme schopni měřit bezkontaktními přístroji se skládá z pohltivosti, propustnosti a odrazivosti.

2.4.1. Pohltivost (α)

- je schopnost materiálu pohltit (absorbovat) infračervené záření. ^[L3]

2.4.2. Propustnost (τ)

- je schopnost materiálu předat (vpustit) infračervené záření.
Závisí na tloušťce a druhu materiálu, přičemž většina materiálů je nepropustná. ^[L3]

2.4.3. Odrazivost (ρ)

- je schopnost materiálu odrážet infračervené záření.
Závisí na teplotě a druhu materiálu a také na charakteru povrchu. Hladké a leštěné povrchy odrážejí více než hrubé a matné povrchy stejného materiálu. ^[L3]

2.5. Kirchhoffův zákon pro záření

Kirchhoffův zákon pro záření říká, že součet těchto složek je roven jedné [L1]

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (3).$$

Poměr propustnosti v tomto vztahu je ve většině praktických případů zanedbatelný, tudíž můžu psát [L1]

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4).$$

U absolutně černého tělesa je odrazivost rovna nule, proto musí být pohltivost rovna jedné. Jedná se o dokonalý přijímač, který v praxi neexistuje. Zákony vyzařování jsou odvozeny právě pro absolutní černé těleso. Pro popis záření obecných radiačních zdrojů slouží emisivita. ^{[L1][L3]}

2.6. Emisivita (ε)

- je schopnost materiálu vysílat (emitovat) infračervené záření.
- závisí na teplotě, vlnové délce a mnohém dalším

Emisivita, neboli poměrná pohltivost, je dána vztahem [L1]

$$\varepsilon = \frac{I_i(\lambda, T)}{I_\varepsilon(\lambda, T)} \quad (5),$$

kde

I_i - intenzita vyzařování reálného tělesa,

I_ε - intenzita vyzařování černého tělesa.

Emisivita nabývá hodnot od 0 do 1. Hodnoty 1 nabývá právě černé těleso. Reálná tělesa nabývají nižších hodnot emisivity, protože na rozdíl od černého tělesa záření navíc odrážejí a předávají. Pro měření bezkontaktními přístroji je emisivita nesmírně důležitá. Čím vyšší je emisivita, tím nižší je podíl odraženého infračerveného záření a odečítání teplot je přesnější. Emisivita se volí na měřicím přístroji. Pokud bychom zvolili emisivitu větší než je skutečná, přístroj by nám ukázal nižší teplotu povrchu než ve skutečnosti je, pokud je měřený objekt teplejší než okolí. Proto je důležité zvolit stupeň emisivity správně. Při nižším stupni emisivity hraje podstatnou roli jak přesně je nastavená kompenzace odražené teploty. [L1]

2.7. Lambertův zákon

Povrch s definovanou emisivitou nemusí při pohledu z boku pod nějakým úhlem zářit stejně jako při kolmém pohledu. Je to stejné jako při světelných paprscích. Paprsek dopadající pod malým úhlem dopadu se odráží více než paprsky, které dopadají kolmo. Dalo by se říci, že s růstem úhlu dopadu roste i odrazivost povrchu. To platí i pro sálání, kdy se zvětšujícím se úhlem od kolmice klesá teplota měřeného bodu. Tento jev popisuje Lambertův zákon [L1]

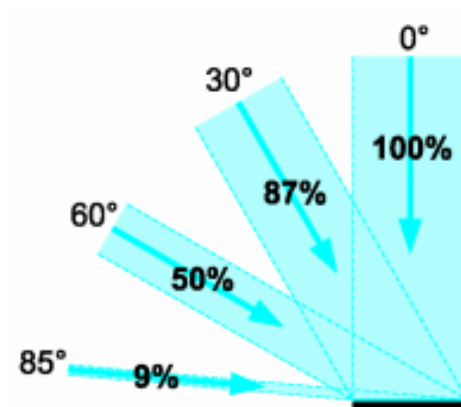
$$dI_{\varphi,\varepsilon} = dI_{\varepsilon} \cdot \cos \varphi = I_{\varepsilon} \cdot \cos \varphi \cdot dS \quad (6),$$

kde

dI_{ε} - intenzita vyzařování ve směru normály k ploše zářiče dS ,

φ - úhel zářiče, který svírá s normálou k ploše zářiče,

$dI_{\varphi,\varepsilon}$ - Intenzita vyzařování v daném úhlu φ .



obr. 2.4 – Lambertův kosinový zákon [2]

2.8. Faktory ovlivňující měření bezkontaktními přístroji

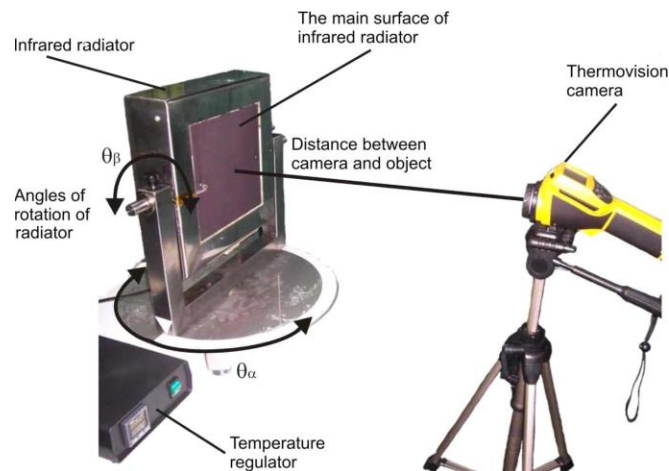
Povrch každého materiálu je jiný a má jiný stupeň emisivity. Avšak barva povrchu nemá na měření bezkontaktními přístroji žádný vliv. Je všeobecně známo, že černá resp. tmavá barva přitahuje více světla než světlé barvy. Jinak řečeno více pohlcují krátkovlnné infračervené záření. Vysílané infračervené záření ale závisí na teplotě objektu. Kdybychom měli černě a bíle lakovaná otopná tělesa o stejné teplotě, vyzařovaly by stejné množství infračerveného záření. Charakter povrchu při měření teploty je rozhodující faktor, jelikož s drsností, znečištěním nebo krycí vrstvou se mění i emisivita povrchu. Lesklé, hladké, zrcadlové povrchy se vyznačují nižším stupněm emisivity na rozdíl od drsnějších nebo i poškrábaných povrchů stejného materiálu. U zrcadlových povrchů často dochází i k zrcadlovým odrazům. Pokud bychom měřili ve venkovním prostředí, museli bychom brát ohled na to, že teplota objektu může být zkreslena venkovními vlivy, jako je jinovatka nebo sníh. Nečistoty na povrchu objektu, jako např. prach, olej, saze, zvyšují emisivitu. Musíme brát ale na zřetel, že měříme teplotu povrchu, tudíž teplotu právě těch nečistot, a ne teplotu měřeného objektu. ^[L3]

3. MODERNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ VE SVĚTĚ

3.1. Experiment Mariusze Litwi

3.1.1. Popis experimentu

V roce 2010 v Polsku měřil Mariusz Litwa experiment „Závislost úhlu pohledu na měření teploty termovizní kamerou“. Což je obdobný experiment tomu mému. Mariusz použil 3 termovizní kamery, 3 vzdálenosti mezi kamerami a zářičem (0,55 m; 1,55 m; 3,6 m), a teploty 100 °C a 200 °C. Měl k dispozici infračervený zářič, který se mohl otáčet ve dvou osách, tudíž kamera zůstala v jedné pozici na stojanu.



obr. 3.1.-1 – Laboratorní set

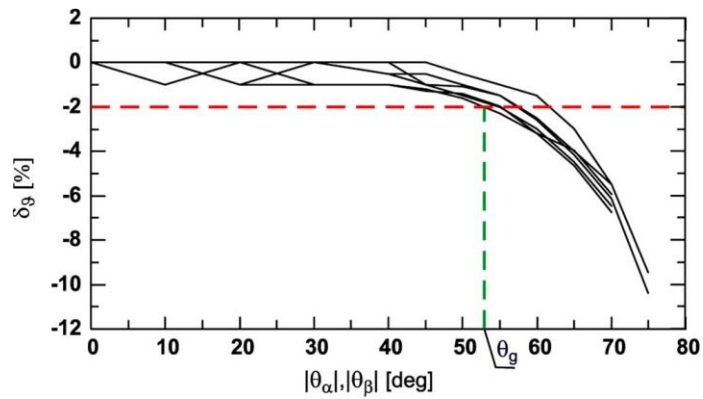
Tento laboratorní set je prakticky jednodušší, my ho ale bohužel k dispozici nemáme.

Infračervený zářič má plochý povrch, který má konstantní teplotu a specifický koeficient emisivity. Je vyroben z hliníku a boky se zadní částí jsou izolovány od okolí. Měřený povrch byl vystaven anodické oxidaci, aby se zvýšila emisivita. Emisivitu zjistil porovnávací metodou – $\varepsilon = 0,98$.

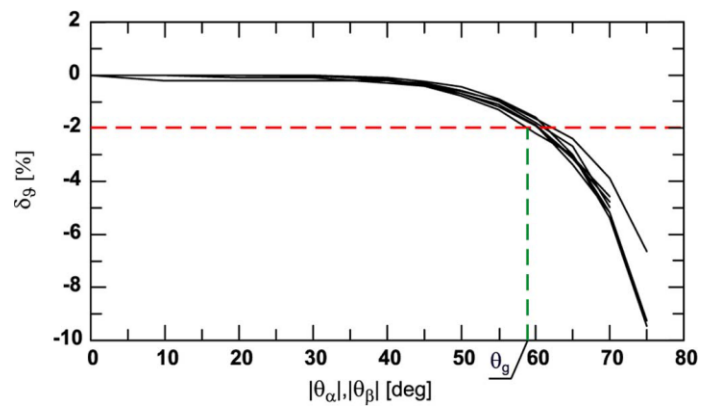
Výsledkem jeho experimentu měly být „kritické“ úhly, ve kterých je měření termovizními kamerami ještě dostatečně spolehlivé.

Nejdříve změřil teplotu povrchu kolmo ke kameře, kterou označil jako správnou, a poté měnil úhly po 10° na jednu stranu a v rozmezí 45° až 65° zjevně měnil úhly v menších krocích, protože očekával chybu více než 2%, která určovala právě hledaný „kritický“ úhel. Naměřené hodnoty vynesl do grafů.

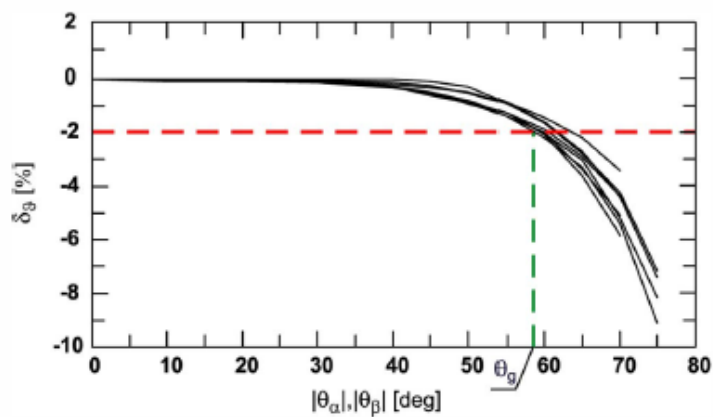
3.1.2. Vyhodnocení experimentu



obr. 3.1.-2 – Závislost naměřené chyby na zorném úhlu pro kameru ThermaCAM E25 a vzdálenost $l = 0,55$ m



obr. 3.1.-3 – Závislost naměřené chyby na zorném úhlu pro kameru Ti20 a vzdálenost $l = 0,55$ m



obr. 3.1.-4 – Závislost naměřené chyby na zorném úhlu pro kameru TH7800 a vzdálenost $l = 0,55$ m

Length l between camera and object	Camera type		
	ThermaCAM E25	Ti20	TH7800
	Critical values of angle of view θ_c		
$l_1 = 0,55$ m	53°	58°	58°
$l_2 = 1,50$ m	54°	57°	60°
$l_3 = 3,60$ m	57°	57°	60°

tab. 3.1. – Kritické úhly jednotlivých typů termokamer při různých vzdáleností

Shrnutí:

Kritické úhly v grafech jsou vyznačeny zelenou barvou a jsou v intervalu 53° až 60°. Ve shrnutí Litwa označil měření termovizními kamerami v úhlu pohledu pod 50° za dostatečně spolehlivé. Měření pod většími úhly by mohlo být zatíženo značnou chybou.

Mariusz Litwa měřil vyšší teploty (100 °C a 200 °C) než já, ale očekával bych podobné výsledky i pro moje nižší teploty (40 °C, 60 °C, 80 °C). ^[LA]

3.2. Experiment Pabla R. Muniz, Shirley P. N. Cani, a Robsona da S. Magalhães

3.2.1. Popis experimentu a podmínky měření

Tito pánové prováděli experiment nazvaný „Vliv zorného pole termokamer a úhel pohledu na měření teploty termovizí“. Z názvu plyne, že se zabývali stejným problémem jako já a to vlivem úhlu pohledu. Dále ale taky vzali v úvahu, jak ovlivňuje chybu měření zorné pole kamery.

V experimentu byla použita jedna termokamera s různými zornými poli: horizontální a vertikální, takže tento nástroj poskytuje dvě odlišné podmínky měření. Dále sada objektivů se třemi zornými poli. Průběžně měřili teplotu a relativní vlhkost, aby bylo možné vypočítat atmosférický útlum pomocí softwaru termokamery. Charakteristika termokamery je uvedeny v tab. 3.2.-1.

THERMAL IMAGER USED IN EXPERIMENTS	
Characteristic	Thermal Imager
Manufacturer	Flir
Model	P640
Resolution	0.1 °C
Uncertainty from catalogue	2 °C
FOV (Field of View)	24 ° x 18 °
Focal Plain Array size	640 x 480 pixels
Additional lens FOV	7°

tab. 3.2.-1 – Charakteristika termokamery

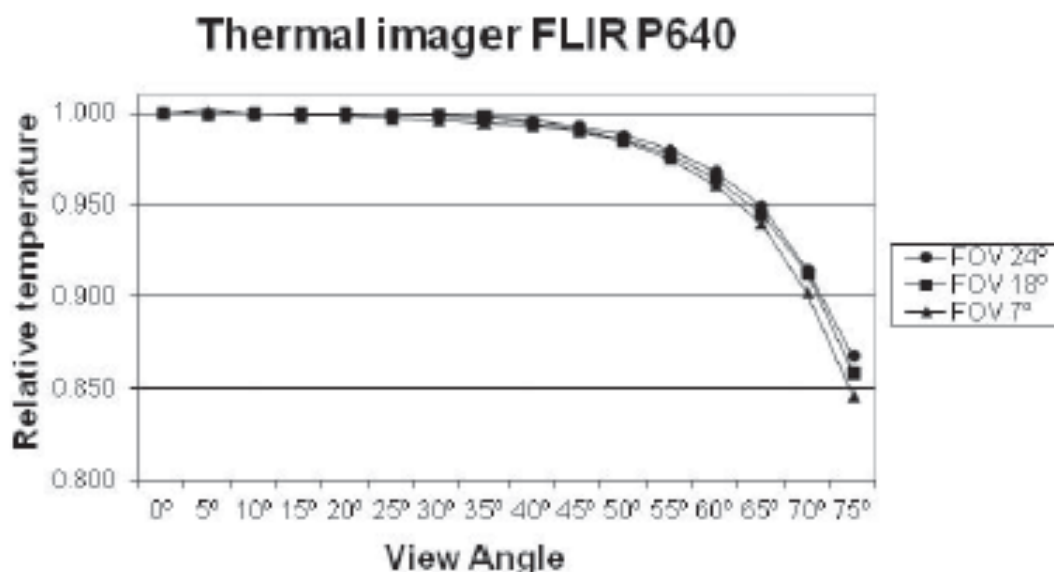
Podmínky měření:

- Vzdálenost mezi měřeným objektem a termokamerou byla konstantní 2 m.
- Pozorovací úhly od -75° do $+75^\circ$ v krocích po 5° . Jako Referenční teplotu zvolili tu v úhlu 0° . Tato referenční teplota byla jmenovatelem ve vztahu počítaném mezi ní a teplotami naměřenými v různých úhlech.
- Velikost analyzovaného objektu je minimálně třikrát větší než velikost pixelu termokamery pod libovolným úhlem pohledu.
- Jak pro každý úhel pohledu, tak pro každou čočku bylo provedeno 10 měření.
- Teplota objektu byla stanovena na 100°C a byla konstantní po celou dobu experimentu. Tato teplota je reprezentativní pro průmyslové elektrické zařízení pracující při plném zatížení.
- Povrch byl matně černý a plochý.
- Experimenty byly prováděny v uzavřené místnosti, aby se zmírnila reflexe a záření z atmosféry bylo kompenzováno softwarem termokamery.

3.2.2. Vyhodnocení experimentu

Teplota každého měřeného bodu pro každý úhel pohledu je vypočítaný průměr z 10 provedených měření. Tři Sady měření byly získány pomocí termokamery Flir P640 v horizontální poloze (24° FOV), ve svislé poloze (18° FOV) a další sadou objektivu (7° FOV).

Graf na obr. 3.2. zobrazuje závislost relativní teploty na úhlu pohledu pro tři různá zorná pole.



obr. 3.2. – Výsledky měření

Je vidět, že chyba měření se projevuje nad úhlem 45°. Nicméně v předběžné a kvalitativní analýze bylo zjištěno, že mají odlišné chování v závislosti na zorném poli termokamery. Čím větší zorné pole, tím menší chyba. Čím menší zorné pole, tím menší přijímací prostor, tudíž bylo přijato méně záření (termokamerou).

Analýza výsledků:

Data získaná v každé ze tří sad měření byli porovnány s cílem zjistit, zda se významně liší mezi sebou na hladině spolehlivosti 90%. Použili nástroj „Párový T-Test“. T-hodnota větší než 1,73 znamená, že data jsou odlišné na hladině 90%. Výsledky jsou v tabulce 3.2.-2.

PAIRED T-TEST RESULTS COMPARISONS – TEMPERATURE
MEASUREMENT FROM DIFFERENT FOVs

Angle of view / °	24° x 18° FOV	24° x 7° FOV	18° x 7° FOV
5	0.50	-2.87	-2.68
10	0.08	0.39	0.09
15	-0,15	1.48	1.08
20	-0.12	0.82	0.70
25	0.61	2.95	1.37
30	0.64	3.63	1.74
35	0.45	4.57	3.70
40	1.37	3.68	1.77
45	1.87	3.62	2.26
50	1.79	3.63	2.20
55	1.83	3.73	1.78
60	2.06	3.76	1.66
65	2.29	3.72	1.42
70	1.22	3.26	1.73
75	2.35	3.42	1.32

Values equal to or greater than 1,73 are in bold.

tab. 3.2.-2 – Výsledky párového T-Testu

Při pohledu na tabulku 3.2.-2 výsledky naznačují, že různá zorná pole mohou představovat různé výsledky na pozorovacích úhlech větších než 20°. S kombinací analýzou grafu na obr. 3.2. je zřejmé, že čím menší je zorné pole, tím menší je naměřená teplota, také jinak větší chyba.

Porovnáním těchto chyb s nejistotou termokamery uvedenou v katalogu, může být patrné z experimentálních dat zobrazené na obr. 3.2., že termokamera s 24° zorným polem má možnou chybu měření nad 2 % od zorného úhlu 35°. Pro 18° zorné pole je tato chyba

od 35° úhlu pohledu stejná. Pro 7° zorné pole, je tato chyba už od 25° úhlu pohledu. Toto srovnání ukazuje, že chyby měření vzhledem k úhlu pohledu jsou opravdu významné.

Shrnutí:

Jako výsledek experimentů bylo zjištěno, že pozorovací úhel mezi objektem a termokamerou ovlivňuje výsledek měření. Dále bylo zjištěno, že zorné pole termokamery také ovlivňuje měření, zejména při úhlech pohledu nad 25°. ^[L5]

3.2.3. Poznámka

V tomto experimentu dále hodnotili, jakou účinnost lze dosáhnout při použití experimentálních modelů pro opravu chyb při měření. Experimentální modely jsou založeny na umělé neutronové síti a regrese jsou vyvinuty tak, aby chyby v měření napravily. Tímto způsobem bylo zjištěno, že chyby měření se liší předvídatelným způsobem přes vyvinutý model. Kvalita modelování opravy, jako funkce pozorovacího úhlu a zorného pole ukazuje, že je možné stanovit postup jak měřit pomocí termovize v nepříznivých podmínkách, tedy v úhlu pohledu nad 25°. Experimentální modely také nejsou předmětem mé práce, tudíž jsem to zde nepopisoval.

4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

V této kapitole se budu zabývat popisem prostředí a laboratorního vybavení, které jsem měl k dispozici při měření. Dále je zde uvedena charakteristika měřících přístrojů a schéma měření.

4.1. Úkol

Úkolem je řešit experimentálně vliv úhlu pohledu mezi teplotou snímaného objektu a použitým snímačem při využití bezdotykového způsobu měření teploty.

4.2. Popis experimentu

4.2.1. Měřící místo

Měření probíhalo v prostorách fakulty strojní ČVUT, v uzavřené halové laboratoři ústavu techniky prostředí. Na stěně bylo upevněno otopné těleso, nejdříve deskové poté bylo zaměněno za článkové. Na podlahu jsem si nakreslil body, ze kterých jsem snímal teplotu jednotlivými přístroji. Pomocí křídly a provázku jsem vyznačil půlkružnice se středem přímo pod měřenými body na otopném tělese.

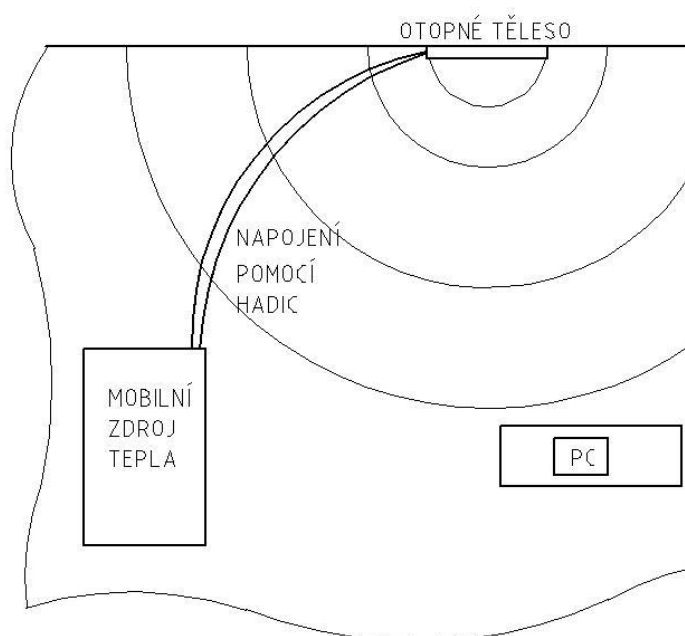
Poloměry kružnic byly zvoleny:

- půlkružnice KA s poloměrem $R_A = 0,5$ m
- půlkružnice KB s poloměrem $R_B = 1$ m
- půlkružnice KC s poloměrem $R_C = 2$ m
- půlkružnice KD s poloměrem $R_D = 3$ m

Na každou půlkružnici jsem vyznačil body, které značily odklon od normály v určitých stupních. Na vrchu každé půlkružnice, kterým tedy procházela normála, byl vyznačen bod 0° . Tento bod byl zvolen jako referenční, ve kterém by měla mít měřená teplota nejpřesnější hodnotu. Poté jsem na obě strany vyznačil zbylé body na kružnici. Směrem vlevo byly kladné hodnoty, směrem vpravo záporné hodnoty úhlu. Rozpětí bodů v úhlových souřadnicích bylo po 10° od 0° do 40° a od 60° do 80° . V rozmezí 40° až 60° bylo rozpětí 5° , protože v těchto úhlech jsem očekával nejistotu větší než dovolenou. Body jsem vyznačil na všech půlkružnicích a přelepil lepicí páskou, abych si je omylem neschmatl. Bohužel jsem byl omezen prostorami místnosti. Na jednu stranu bylo místo pouze 1,5 metru, tudíž půlkružnice KC a KD nejsou úplně do záporných hodnot úhlů. Kompletní měřící prostor je graficky zobrazen ve schématu měření v kapitole 4.3.



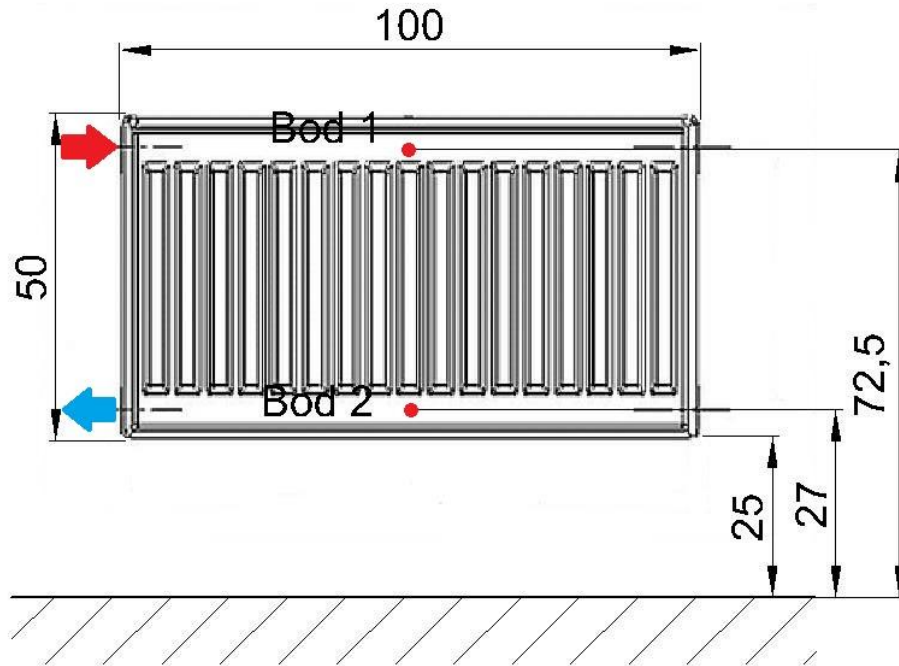
obr. 4.2.-1 – Snímek z termokamery Flir T460 na půlkružnici KD



obr. 4.2.-2 – Schéma měřicího místa

4.2.2. Deskové otopné těleso

Deskové otopné těleso je typu Radik Klasik 10 – 500x1000 napojené z boku jednostranně shora-dolů od firmy KORADO, a.s. Na toto deskové těleso jsem vyznačil 2 body pomocí speciální lepicí pásky. Body jsou uprostřed tělesa, akorát jinak vysoko a mají rozměry obdélníku 1,1x1,6 cm.

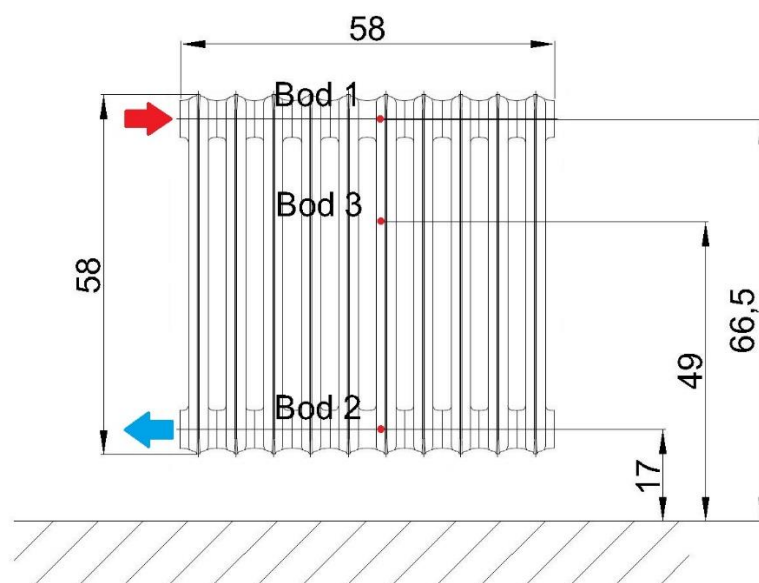


obr. 4.2.-3 – Schéma deskového otopného tělesa a měřených bodů

4.2.3. Článekové otopné těleso

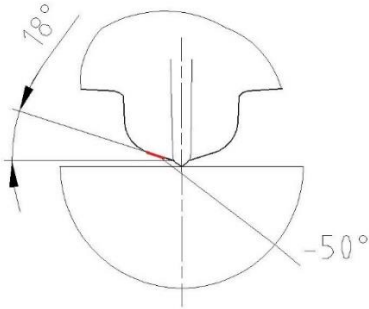
Článekové otopné těleso je typu Kalor od firmy Viadrus, a.s. s 10 články. Na toto deskové těleso jsem vyznačil 3 body pro měření. Body jsem vyznačil na jeden článek, ne přímo doprostřed ale na rovnou plošku. Rozměrově jsou přibližně stejně velké jako body na deskovém otopném tělese.

10 článků



obr. 4.2.-4 – Schéma článkového otopného tělesa a měřených bodů

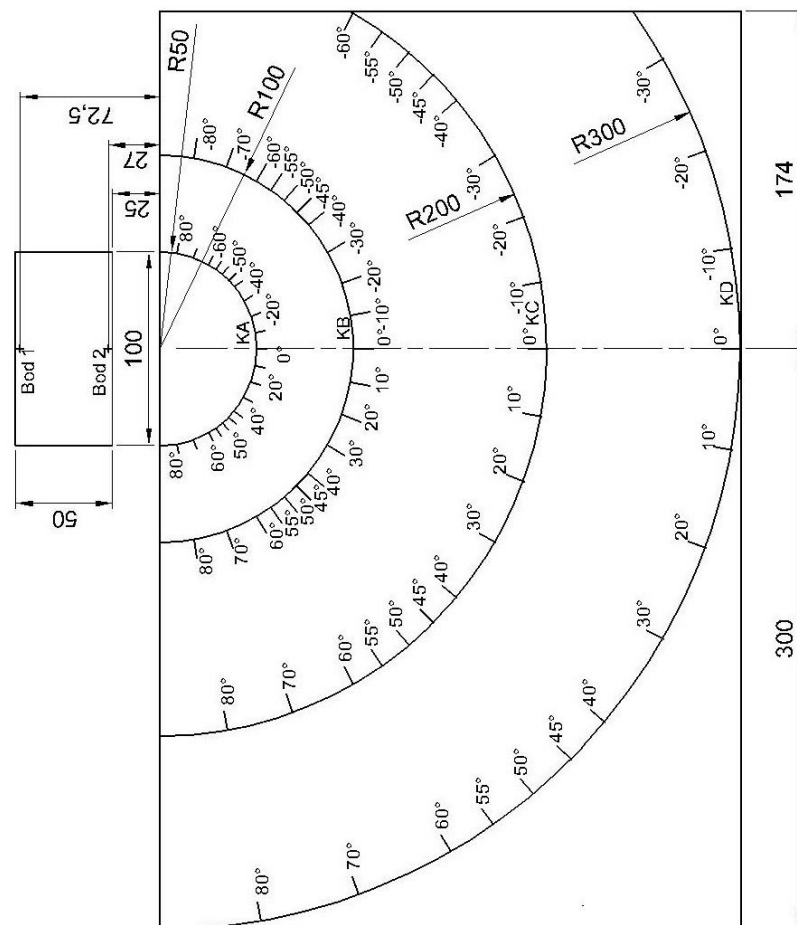
U článkového otopného tělesa je problém, že v 0° na půlkružnicích není kolmice na měřený povrch, ale právě v 18° viz obr. 2.4.-5. Tudiž bych očekával maximum měřené teploty ve 20° . Dále je problém při měření záporných úhlů pohledu. Při měření bodu 1 a 2 jsem měřil jen kladné hodnoty úhlu a při měření bodu 3 jsem měřil až do úhlu -45° . Větší úhly (-50° až -80°) jsem vyhodnotil, že není možné měřit, protože měřicí bod není vidět. Těleso je odlitek, takže je velmi drsný a nepřesný. Zjednodušeně jsem to vyobrazil v obr. 4.2.-5.



obr. 4.2.-5 – Skica článku v půdorysu

obr. 4.2.-6 – Snímek článku v půdorysu

4.3. Schéma měření



obr. 4.3. – Detailní schéma měření

4.4. Použité přístroje

Při měření bylo použito 5 měřících přístrojů, z toho dva bezkontaktní teploměry (Testo QuickTemp 860-T2, Minolta Land Cyclops Mini View) a tři termovizní kamery (Flir i7 EDU, Flir S65, Flir T460). V dalších podkapitolách jsou uvedeny technické parametry jednotlivých přístrojů.

4.4.1. Testo QuickTemp 860-T2

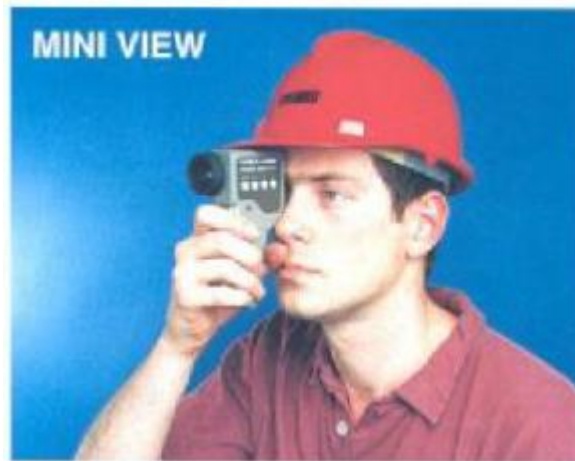
Rozsah:	-30 °C až +900 °C
Přesnost:	-50 až -5 °C → ±(2 °C ± 1 digit) -5 až 75 °C → ±(0,75 °C ± 1 digit) 75 až 900 °C → ±(0,75% z naměřené hodnoty ± 1 digit)
Spektrální rozsah:	8 až 14 μm
Opakovatelnost:	-30 až 900 °C → 0,1 °C
Optické rozlišení:	45:1



obr. 4.4.-1 – Testo QuickTemp 860-T2 [L10]

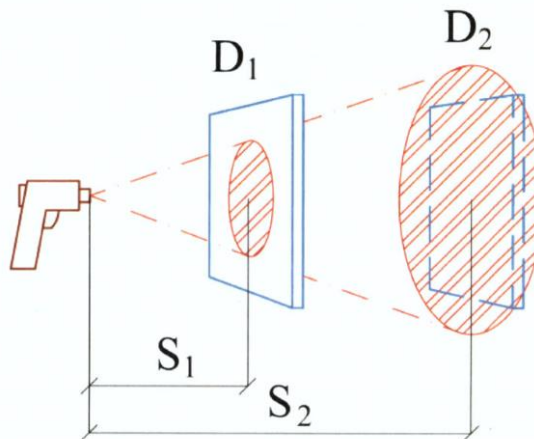
4.4.2. Minolta Land Cyclops Mini View

Rozsah:	-50 °C až +500 °C
Přesnost:	-50 až 0 °C → ±5 °C 0 až 200 °C → ±(2 °C ± 1 digit) 200 až 500 °C → ±(1% z naměřené hodnoty ± 1 digit)
Spektrální rozsah:	8 až 14 μm
Opakovatelnost:	>100 °C → uvnitř ±1 °C 30 až 100 °C → uvnitř ±0,5 °C
Optické rozlišení:	40:1

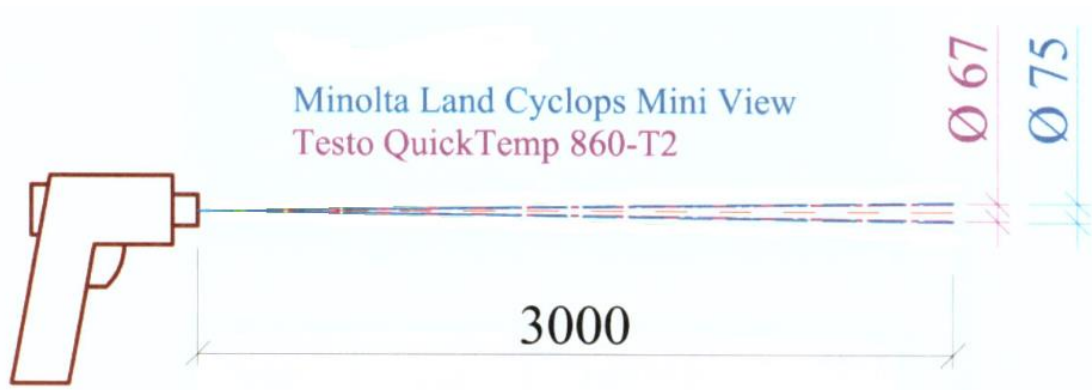


obr. 4.4.-2 – Minolta Land Cyclops Mini View [L11]

U bezkontaktních teploměrů je důležitým faktorem přesnosti měření „tzv. skutečná velikost snímané plochy. Bezdotykové teploměry jsou přístroje, které měří povrchovou teplotu bodově. Optický systém bezdotykových teploměrů ve většině případů snímá teplotu z kruhové měřené plochy a soustřeďuje ji na detektor. Měřený objekt proto musí úplně vyplňovat tuto měřenou plochu, jinak je naměřená hodnota ovlivněna i zářením pozadí (obr. 4.4.-3). Optické rozlišení je většinou definováno poměrem $D:S$, což je průměr měřené plochy D k vzdálenosti měřicího přístroje od měřeného objektu S . Tato hodnota je většinou uvedena přímo na těle bezdotykového teploměru. Čím menší bude tato hodnota, tím lepší je optické rozlišení měřicího přístroje a tím menší může být měřená plocha při dané vzdálenosti.“ [citováno z [L1] str. 25-26]



obr. 4.4.-3 – Znárodnění zaměřené velikosti snímané plochy detekované bezdotykovým teploměrem [L1]



obr. 4.4.-4 – Velikost měřicí plochy v závislosti na měřené vzdálenosti použitých bezdotykových teploměrů (rozměry jsou v mm) [L1]

Jak je vidět na obr. 4.4.-4, tak měřená plocha je ve vzdálenosti 3 metrech několikrát větší než měřený bod (obdélník 1,1x1,6 cm) na otopných tělesech, na který jsem se soustředil. S tím se ale musí počítat.

4.4.3. Flir i7 EDU

Rozsah:	0 °C až 250 °C
Přesnost:	± 2 % s teplotní citlivostí 0,1 °C
Spektrální rozsah:	7,5 až 13 μm
Zorné pole:	25° x 25°
Display:	2,8“ barevný LCD
Optika:	pevné ohnisko, bez ostření
IR rozlišení:	120 x 120 pixelů



obr. 4.4.-5 – Termovizní kamera Flir i7 EDU [L9]

4.4.4. Flir S65

Rozsah:	-40 °C až 120 °C
Přesnost:	±2 °C nebo ±2 % z absolutní hodnoty teploty ve °C

Spektrální rozsah:	7,5 až 13 μm
Zorné pole:	24° x 18°
Display:	4“ barevný LCD
Optika:	manuální zaostřování
IR rozlišení:	320 x 240 pixelů



obr. 4.4.-6 – Termovizní kamera Flir S65 [L9]

4.4.5. Flir T460

Rozsah:	-20°C až +120 °C
Přesnost:	± 2 °C nebo ± 2 % z absolutní hodnoty teploty ve °C
Spektrální rozsah:	7,5 až 13 μm
Zorné pole:	25° x 19°
Display:	3,5“ barevný LCD
Optika:	automatické ostření
IR rozlišení:	320 x 240 pixelů



obr. 4.4.-7 – Termovizní kamera Flir T460 [L9]

U termokamery Flir T460 a S60 byl problém při měření bodů na článkovém otopném tělese na půlkružnici KA (0,5 m). Při měření úhlů 70° a 80°, tedy krajních úhlů,

překážel stojan termokamery, na kterém byla kamera upevněna. Stojan má 3 nohy, se kterými jsem nebyl schopen se dostat tak blízko otopnému tělesu, takže tyto hodnoty nebyly naměřeny.

4.5. Mobilní zdroj tepla

K měření byl použit stejný mobilní zdroj tepla, se kterým pracoval Ing. Lukeš J. v roce 2009 pro svojí diplomovou práci „Vliv napojení otopných těles na tepelný výkon“.

„K měření byl využit mobilní zdroj tepla. Toto zařízení se skládalo z otevřené expanzní nádoby, která byla osazena ultratermostatem Labio CTB 06, čerpadla Grundfos UPE 25-40, čerpadla Grundfos Magma 32-100, akumulární nádoby a ultrazvukového průtokoměru Landy & Gyr. Regulace průtoku byla prováděna dvěma vyvažovacími ventily. Na vstupu i výstupu z měřeného otopného tělesa byly upevněny teploměry, které umožňovaly odečet teplot vstupní a výstupní otopné vody.

Ultratermostat Labio CTB 06 umožňuje přesně udržovat teplotu ohřivané otopné vody. Teplota ohřivané otopné vody je sledována čidlem Pt 500 a dále je regulována víceúrovňovou elektronickou jednotkou s digitálním nastavením požadované teploty. Ultratermostat Labio CTB 06 je osazen míchadlem integrovaným ve skříňce regulačního obtoku. Nádrž expanzní nádoby má objem 6 litrů a je vyrobena z nerezového plechu. Ve spodní části expanzní nádoby je umístěna topná spirála o výkonu 2000W.

Akumulární nádoba je osazena topnými spirálami o výkonu 400, 500, 1000 a 2000W. Teplota otopné vody v akumulární nádobě je sledována čidly Pt 500, která jsou umístěna ve spodní a horní části akumulární nádoby. Akumulární nádoba má objem 60 litrů.

Pro nastavení průtoku otopné vody a tím i jmenovitých teplotních podmínek je mobilní zdroj tepla vybaven vyvažovacím ventilem na vratné větvi a pro jemnější regulaci průtoku slouží ještě vyvažovací ventil v obtoku čerpadla. Pro odečítání hodnot je celé zařízení doplněno o ultrazvukový průtokoměr Landy & Gyr.“ [citováno z [L6] str. 33]



obr. 4.5. – Mobilní zdroj tepla

4.6. Podmínky měření

Měření probíhalo ve vnitřním prostředí, převážně v zimních měsících od prosince do poloviny dubna, takže při nízkých venkovních teplotách. Venkovní teplota u měření v interiéru má ale nízký vliv na celkovou nejistotu. Důležitější je, že měřící prostředí je bez znečištění. Laboratoř považuji za čisté prostředí. Měřený povrch, tedy otopná tělesa byla před použitím zbavena nečistot. Měřená teplota nepřesáhla 100 °C, tudíž největší vliv na nejistotu měření má zajisté emisivita a zdánlivě odražená teplota. Zdánlivě odraženou teplotu jsem měřil kulovým teploměrem v průběhu měření. Kulový teploměr měří střední radiační teplotu t_g , ta ale ve vnitřním prostředí odpovídá právě zdánlivě odražené teplotě t_r . U emisivity ani tak nezáleží na tom, jak přesnou hodnotu volím, ale spíše na tom, aby byla u každého měřicího přístroje konstantní, protože mi jde o rozdíl teplot. Další významný vliv na celkovou nejistotu měření má praktická zkušenost uživatele. Jde o správné pořízení snímků a také jejich vyhodnocování. S termokamerami, ani bezdotykovými teploměry jsem se v dřívější době neseťkal. Pouze pár informací mi bylo poskytnuto na předmětu Technické měření.

5. PRŮBĚH MĚŘENÍ

5.1. Popis měření

Měření probíhalo po etapách. Každý den jsem stihnul naměřit jednu, výjimečně dvě teploty pro každý měřicí přístroj.

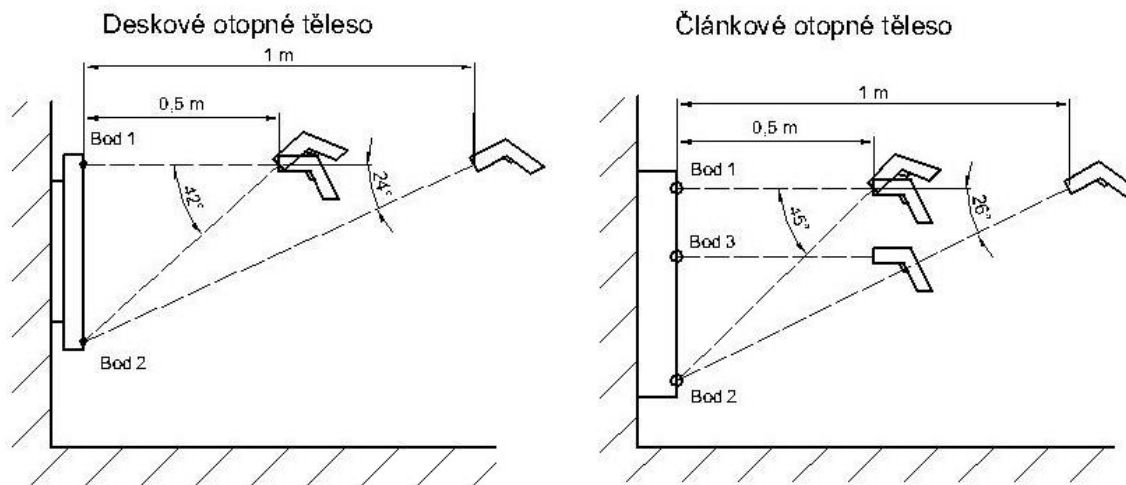
Nejprve jsem musel nastavit požadovanou teplotu na ultratermostatu a poté zapnout topné spirály v akumulární nádobě, které vodu na danou teplotu ohřály. Nastavované teploty byly odlišné pro deskové otopné těleso a pro článkové otopné těleso. Pro deskové bylo zvoleno 42 °C, 62 °C a 81 °C, a pro článkové 44 °C, 64 °C a 84 °C. Nastavoval jsem teploty vyšší, protože teplota na ultratermostatu udává teplotu vstupní vody, takže teplota měřených bodů byla vždy menší (cca 40°C, 60°C, 80°C). Jakmile teplota dosáhla požadovaného stavu, topné spirály jsem vypnul a čekal až se teploty na vstupu a výstupu ustálí. Během měření jsem musel několikrát odbíhat a kontrolovat teplotu vody v akumulární nádobě, protože měření trvalo dlouho a voda mezitím chladla. Vždy jsem tedy zapnul některou topnou spirálu, aby se voda zase dohřála.

Dalším důležitým faktorem, bez kterého by měření bylo zatíženo velkou chybou, je konstantní teplota v otopném tělese. Na vstupu a výstupu otopného tělesa byly umístěny teploměry, takže důležité bylo, aby tyto teploty byly neměnné ($\pm 0,1$ °C). To jsem také kontroloval během měření.

S každým měřicím přístrojem jsem měřil zvlášť. Důležité bylo, aby měřicí přístroj byl při měření ve stejné výšce, jako je bod 1. Když jsem měřil bod 2, došlo pouze k naklonění přístroje (viz obr. 5.1.). Takhle jsem naměřil hodnoty teplot pro každý vyznačený bod na podlaze. Toto se opakovalo pro všechny teploty s každým přístrojem. Pouze u termokamer Flir S65 a T460, které byly posazeny na podstavci, nedocházelo na půlkružnici *KC* a *KD* k naklonění přístroje, protože kamery byly schopny zabrat oba body naráz. Pro bod 2 na otopném tělese v 0° jsem musel změřit teplotu, kdy byl přístroj ve stejné výšce jako právě bod 2. Tato teplota byla referenční pro bod 2. V tabulkách byla poznamenána s názvem „dole“.

Během měření jsem si poznamenával teploty vzduchu t_a na stíněném rtuťovém teploměru, který byl zavěšený asi 3 metry od otopného tělesa ve výšce 1,5 metru od podlahy a střední radiační teplotu na kulovém teploměru.

Při měření deskového otopného tělesa mi asistoval vedoucí práce Ing. Roman Vavříčka Ph.D., takže měření bylo efektivnější. Já pracoval s přístroji a kolega zaznamenával hodnoty do tabulek a hlídal teploty vstupu a výstupu.



obr. 5.1. – Zobrazení měření bodu 2

	ψ – úhel naklonění přístroje	
	Deskové otopné těleso	Článekové otopné těleso
$R_A = 0,5 \text{ m}$	42°	45°
$R_B = 1 \text{ m}$	24°	26°
$R_C = 2 \text{ m}$	13°	14°
$R_D = 3 \text{ m}$	9°	9°

tab. 5.1. – Úhel naklonění přístroje ψ při měření bodu 2

5.2. Popis zpracování naměřených hodnot

Mám 5 měřících přístrojů, 2 otopná tělesa (jedno se 2 měřícími body, druhé se 3 měřícími body), 3 teploty (cca 40 °C, 60°C, 80°C) a 75 měřících pozic na půlkružnicích. Celkem jsem naměřil 4449 hodnot.

Před měřením jsem si zpracoval tabulky v programu Microsoft Excel 2013, do kterých jsem si zapisoval, hned po změření, hodnotu teploty. V případě termokamer Flir S65 a T460 jsem si do tabulky poznamenával čísla snímků, které jsem pak vyhodnocoval v programu ThermoCAM Researcher Pro 2.10.

Naměřené hodnoty jsem přepočítal podle vztahu

$$\delta = \frac{t_m}{t_{ref}} \cdot 100 \quad (7),$$

kde

δ - relativní nejistota [%],

t_m - teplota naměřená [°C],

t_{ref} - referenční teplota [°C].

Hodnoty δ jsem následně vynášel do grafu v závislosti na úhlu pohledu φ .

KA	60°C			KA	Přepočet	
	1	2			1	2
-80	43,2	34,2		-80	73,97	66,28
-70	47,6	39,2		-70	81,51	75,97
-60	55,4	45,4		-60	94,86	87,98
-55	57,1	47,1		-55	97,77	91,28
-50	57,5	48,8		-50	98,46	94,57
-45	58,2	49,1		-45	99,66	95,16
-40	58,8	50,4		-40	100,68	97,67
-30	58,9	50,4		-30	100,86	97,67
-20	59	51,6		-20	101,03	100,00
-10	58,8	51,7	dole	-10	100,68	100,19
0	58,4	50,4	51,6	0	100,00	97,67
10	58,2	50,4		10	99,66	97,67
20	58,3	50,7		20	99,83	98,26
30	58,3	50,8		30	99,83	98,45
40	58,2	49,5		40	99,66	95,93
45	58,2	50,4		45	99,66	97,67
50	58,2	50,4		50	99,66	97,67
55	57,8	49,1		55	98,97	95,16
60	56,2	46,7		60	96,23	90,50
70	54,5	43,7		70	93,32	84,69
80	43,4	37,2		80	74,32	72,09

tab. 5.2.-1 – Tabulka naměřených teplot tab. 5.2-2 – Tabulka přepočtených hodnot

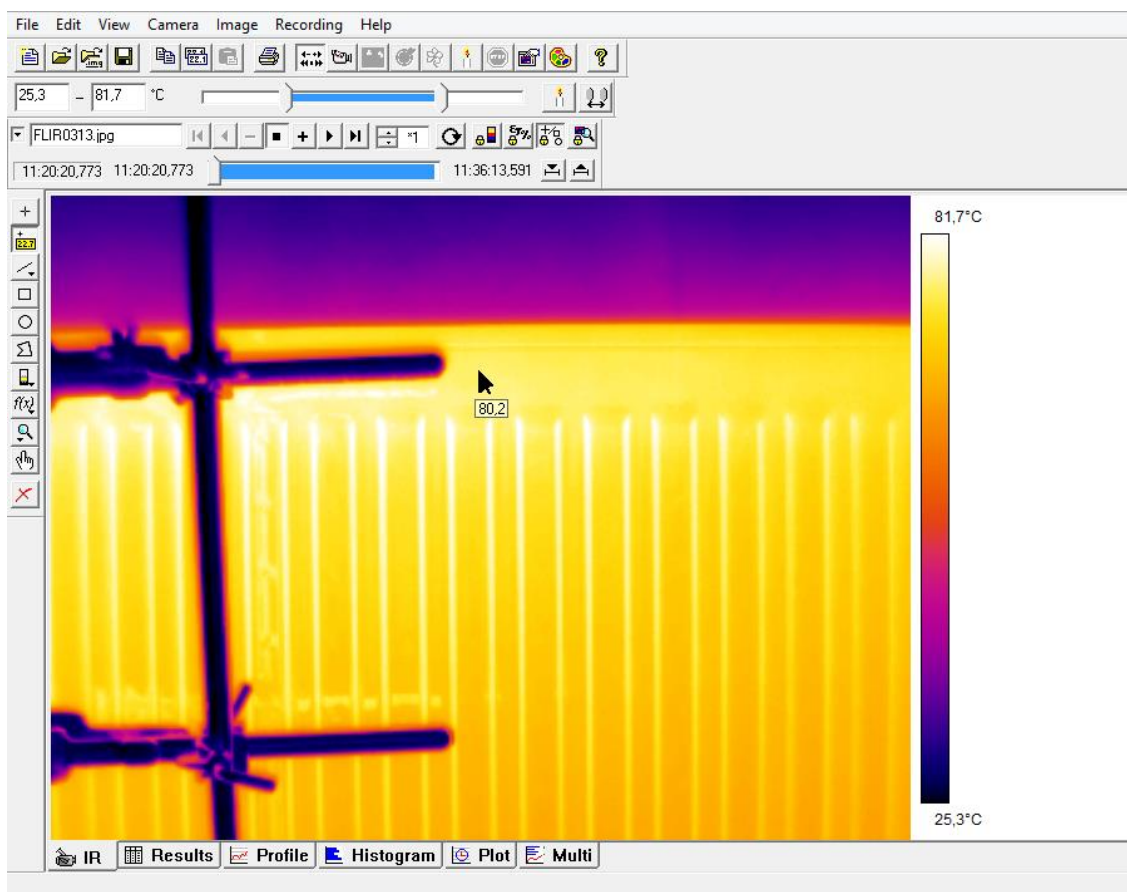
5.3. Práce v programu ThermoCAM Researcher Pro 2.10

Z termokamer Flir S60 a T460 mám snímky, které se během měření ukládaly na paměťovou kartu. Nahrál jsem si je do počítače a otevřel v programu ThermoCAM Researcher Pro 2.10. Práce v tomto programu byla velmi jednoduchá. V nastavení jsem si nastavil pokaždé:

- vzdálenost (R_A , R_B , R_C nebo R_D),
- odraženou teplotu – tím je myšleno průměr ze středních radiačních teplot t_g , které jsem v ten den, ve kterém byl snímek pořízen, naměřil,
- teplotu vzduchu – tím je myšleno průměr z teplot vzduchu t_a , které jsem v ten den, ve kterém byl snímek pořízen, naměřil,
- emisivitu jsem nechal přednastavenou na $\varepsilon = 0,95$.

Dále jsem jen ze snímku odečítal teplotu měřeného bodu pomocí funkce *flying spotmeter*. Myši jsem ukázal na daný bod a program mi ukázal teplotu daného bodu. U Deskového otopného tělesa jsem jako pomůcku používal stojan, který jsem si vždy

postavil tak, aby mi pomohl určit místo měřeného bodu. Tohle nejspíš vyžaduje trochu šikovnosti, ale myslím, že jsem vždy měřený bod určil s dostatečnou přesností.



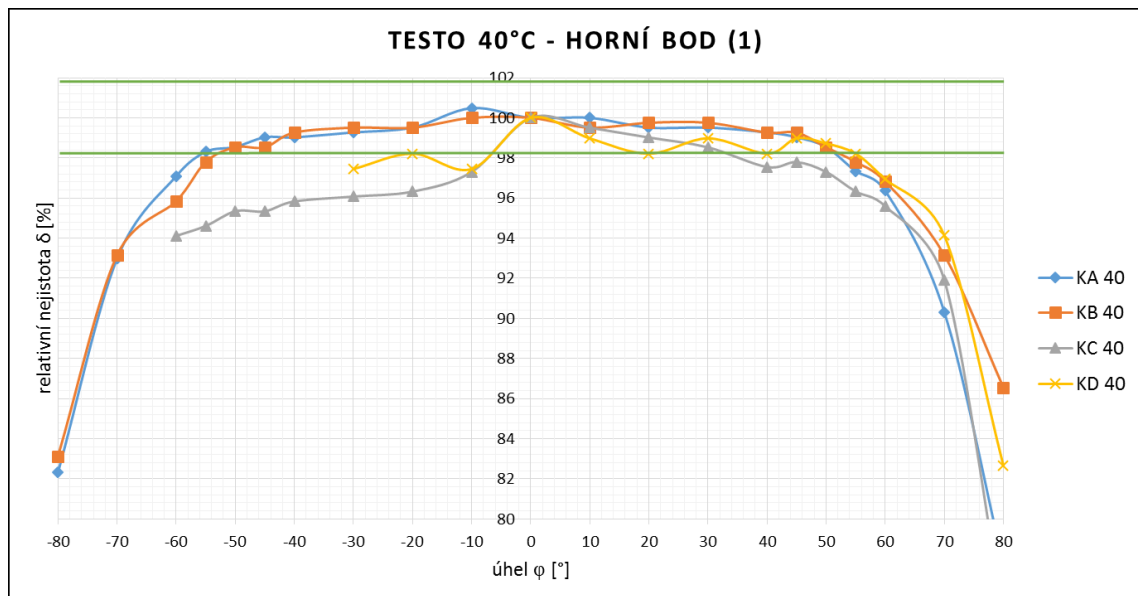
obr. 5.3. – Vyhodnocování snímku v programu

6. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V jednotlivých grafech zelené čáry značí přesnost přístroje danou výrobcem (např. Flir i7 EDU $\pm 2\%$ z naměřené hodnoty). Jednotlivé půlkružnice, které vyznačují vzdálenost měřicího přístroje od měřeného bodu, jsou v grafu rozlišeny barevně. U některých přístrojů je jejich přesnost udávána ve $^{\circ}\text{C}$. Já ji pomocí trojčlenky přepočítal na procenta (vztaženo k referenční teplotě). Přesnost v procentech je uvedena pod každým grafem.

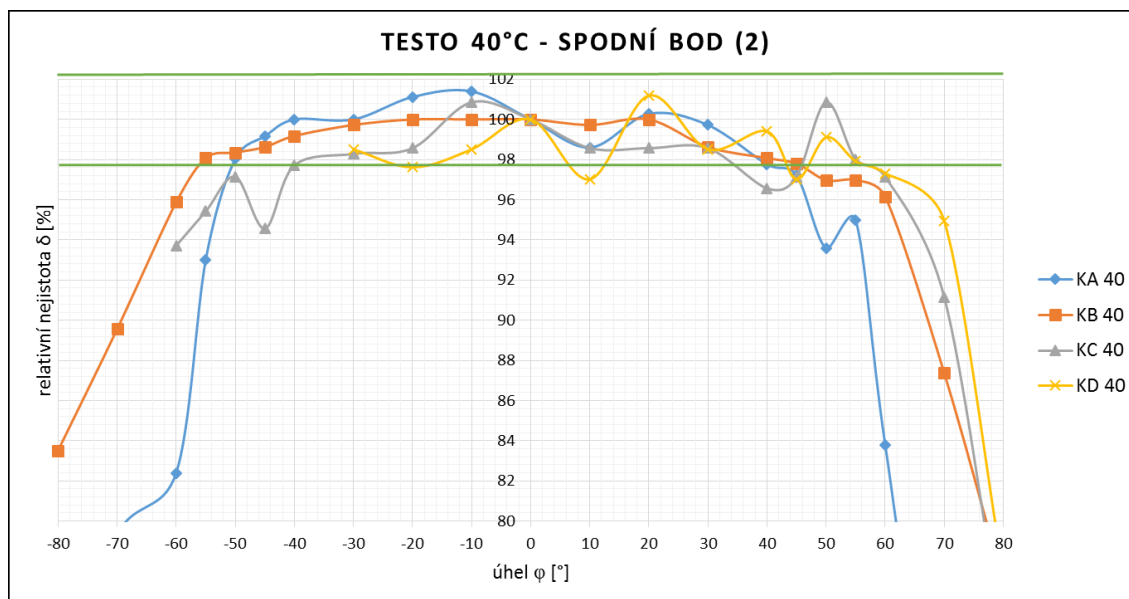
6.1. Deskové otopné těleso

6.1.1. Testo QuickTemp 860-T2

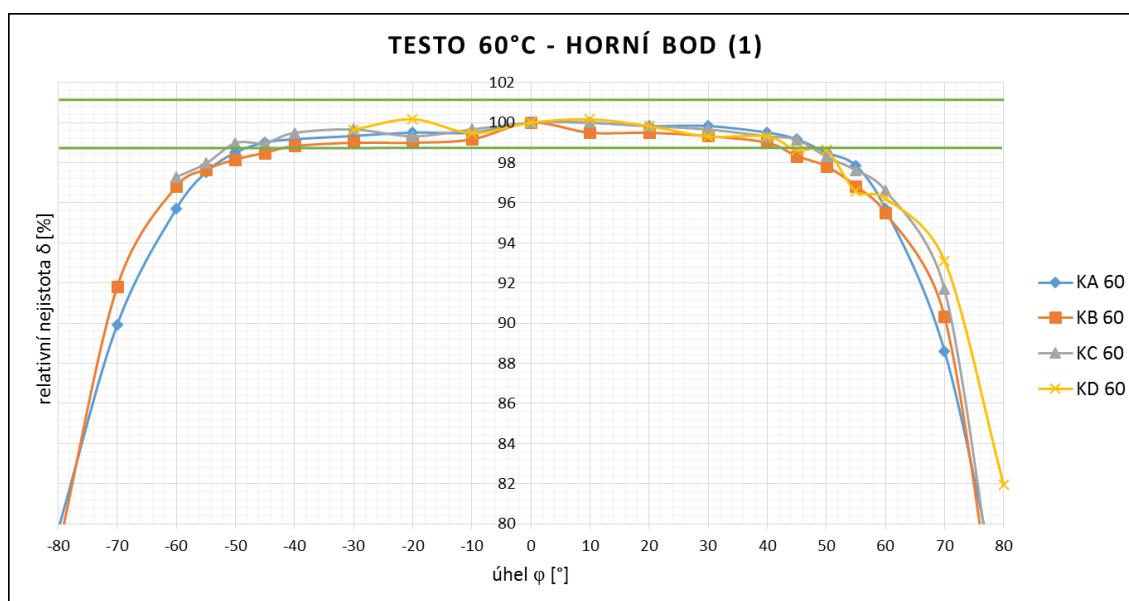


obr. 6.1.-1 – Testo, 40 $^{\circ}\text{C}$, bod 1

Přesnost: $\pm 1,9\%$

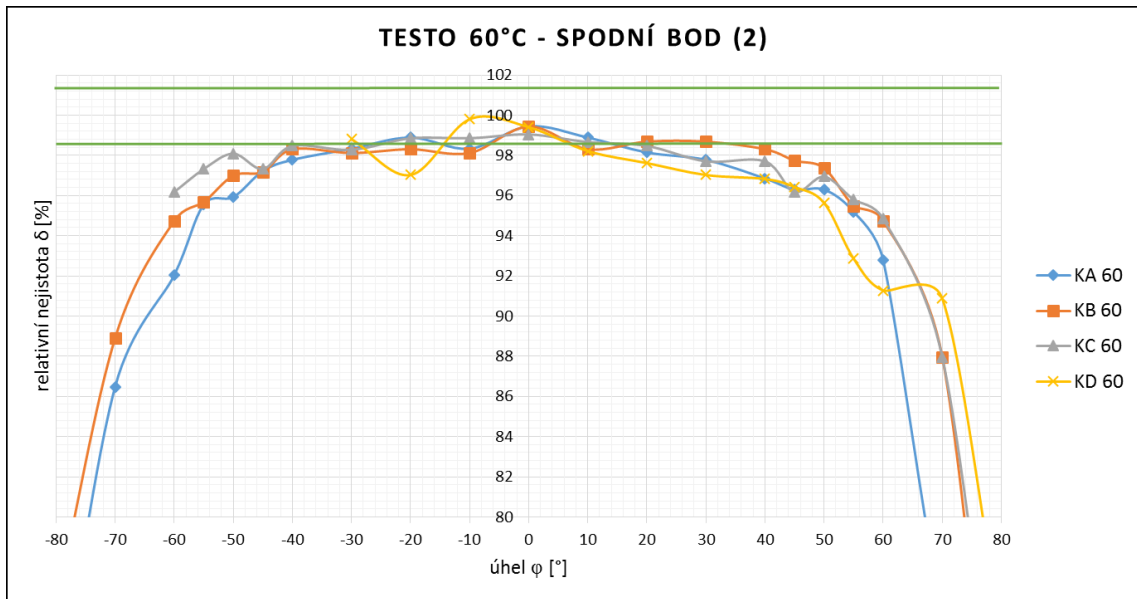


obr. 6.1.-2 – Testo, 40 °C, bod 2

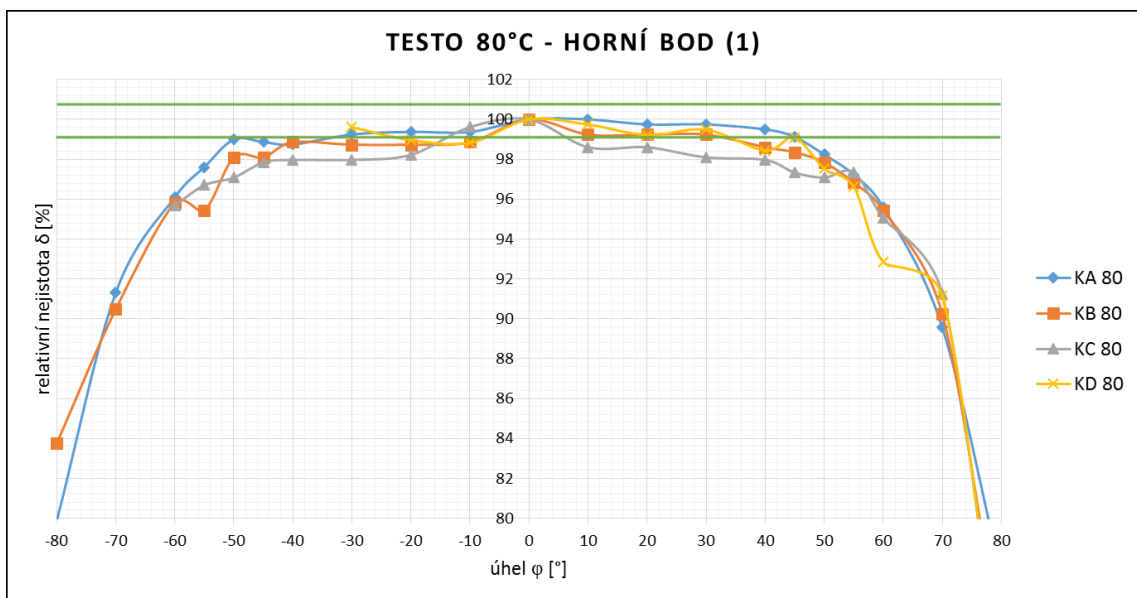
Přesnost: $\pm 2,2\%$ 

obr. 6.1.-3 – Testo, 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 1,2\%$

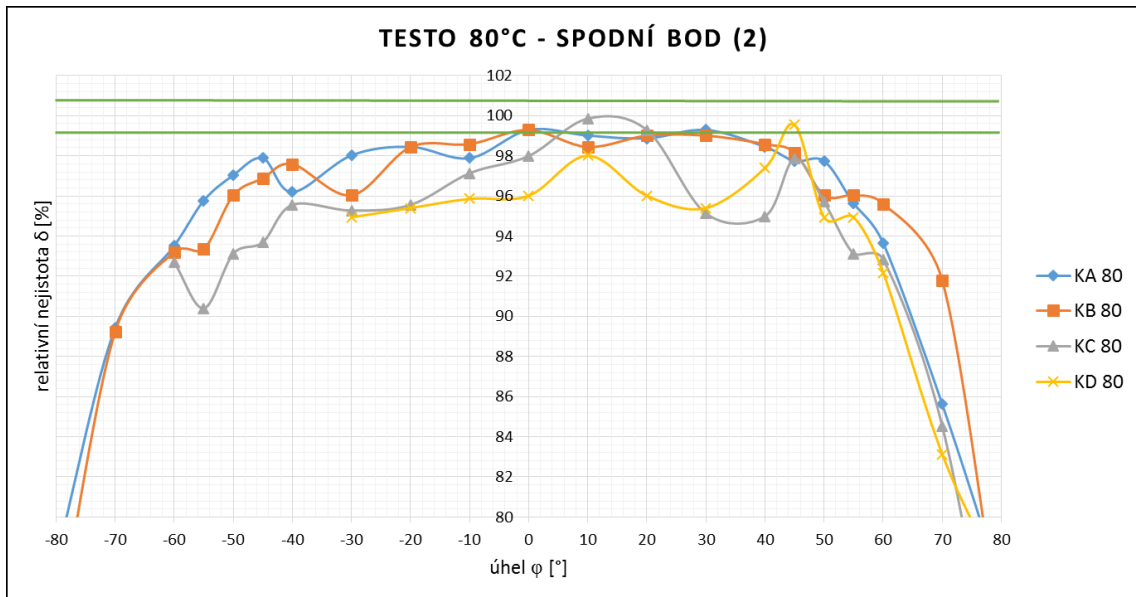


obr. 6.1.-4 – Testo, 60 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 1,4\%$ 

obr. 6.1.-5 – Testo, 80 °C, bod 1

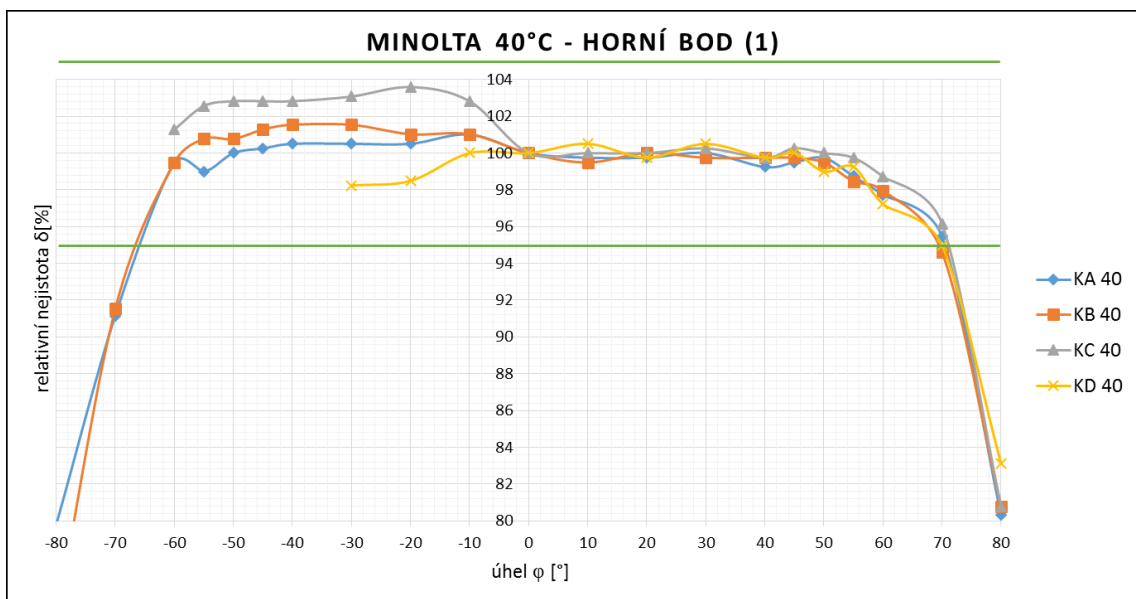
Přesnost: $\pm 0,75\%$



obr. 6.1.-6 – Testo, 80 °C, bod 2

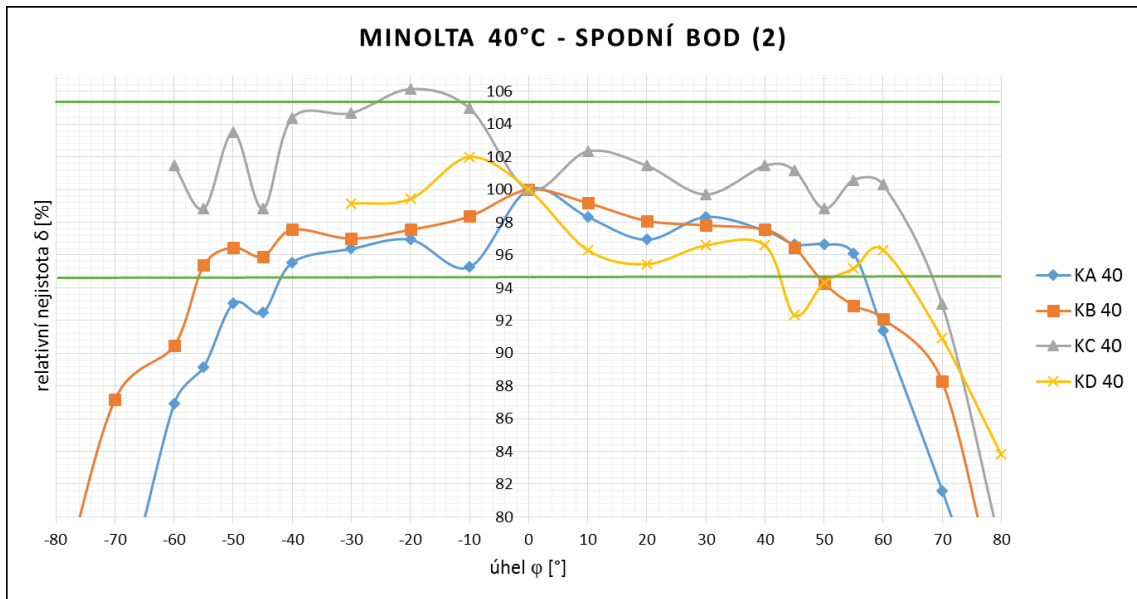
Přesnost: $\pm 0,75\%$

6.1.2. Minolta Land Cyclops Mini View

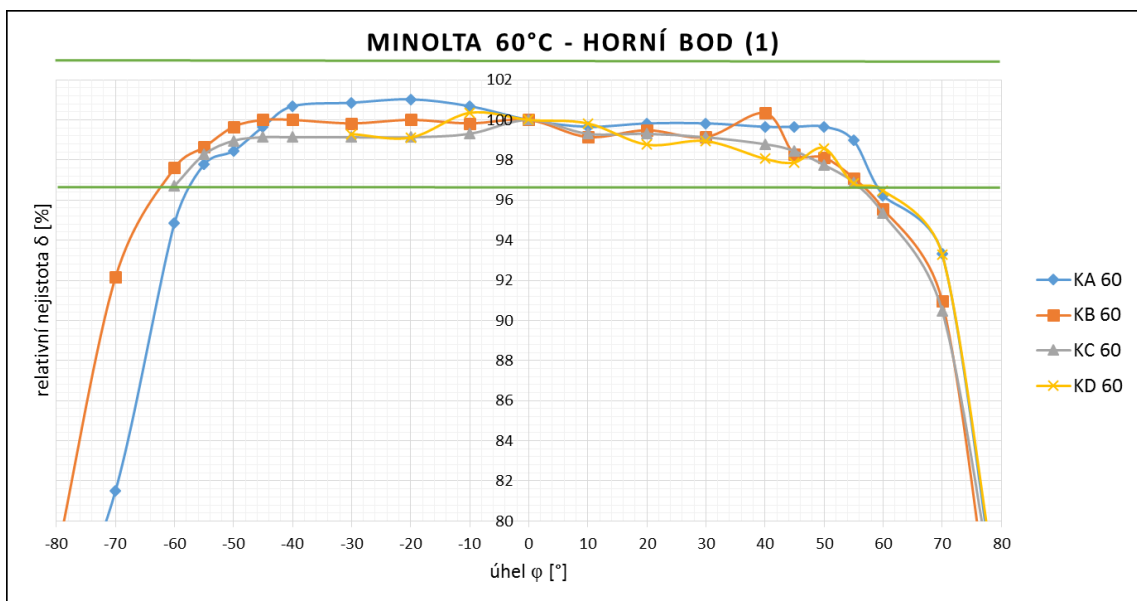


obr. 6.1.-7 – Minolta, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 5\%$

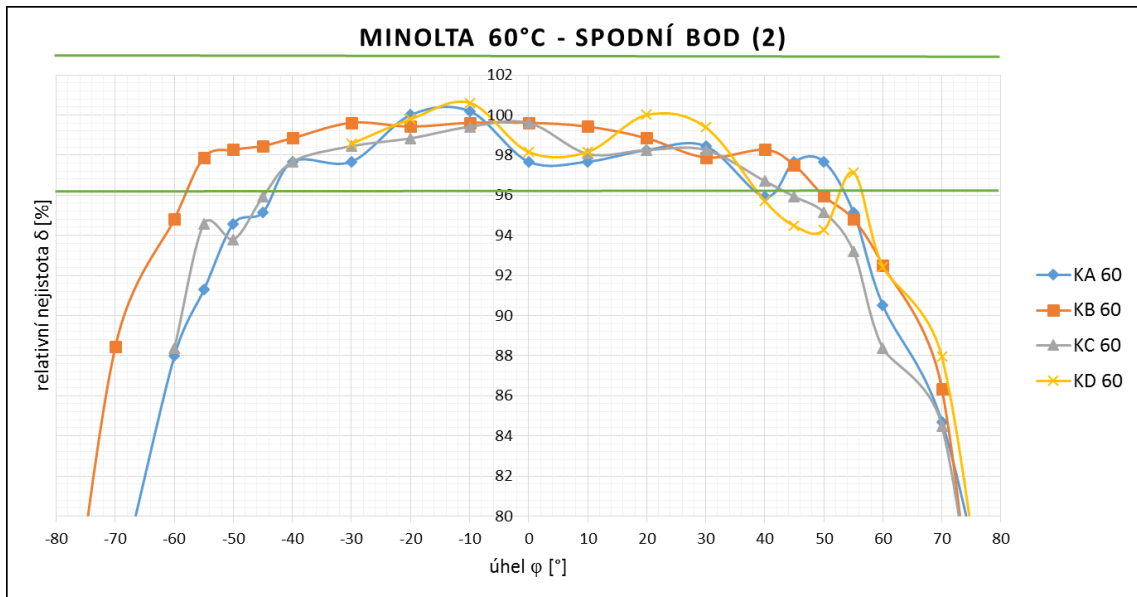


obr. 6.1.-8 – Minolta 40 °C, bod 2

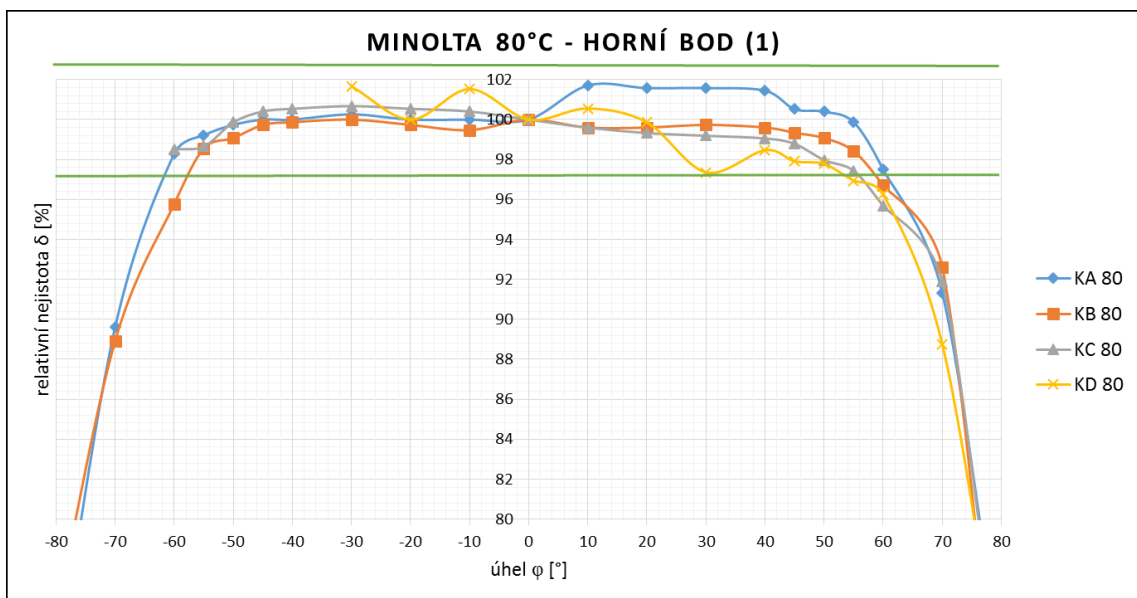
Přesnost: $\pm 5,6\%$ 

obr. 6.1.-9 – Minolta 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 3,5\%$

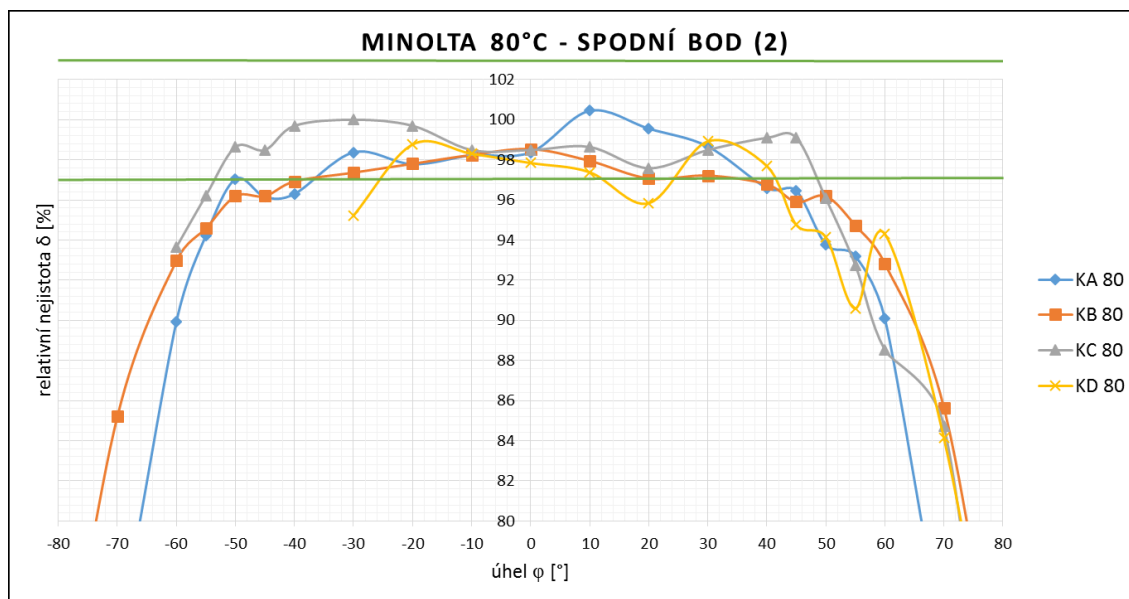


obr. 6.1.-10 – Minolta 60 °C, bod 2

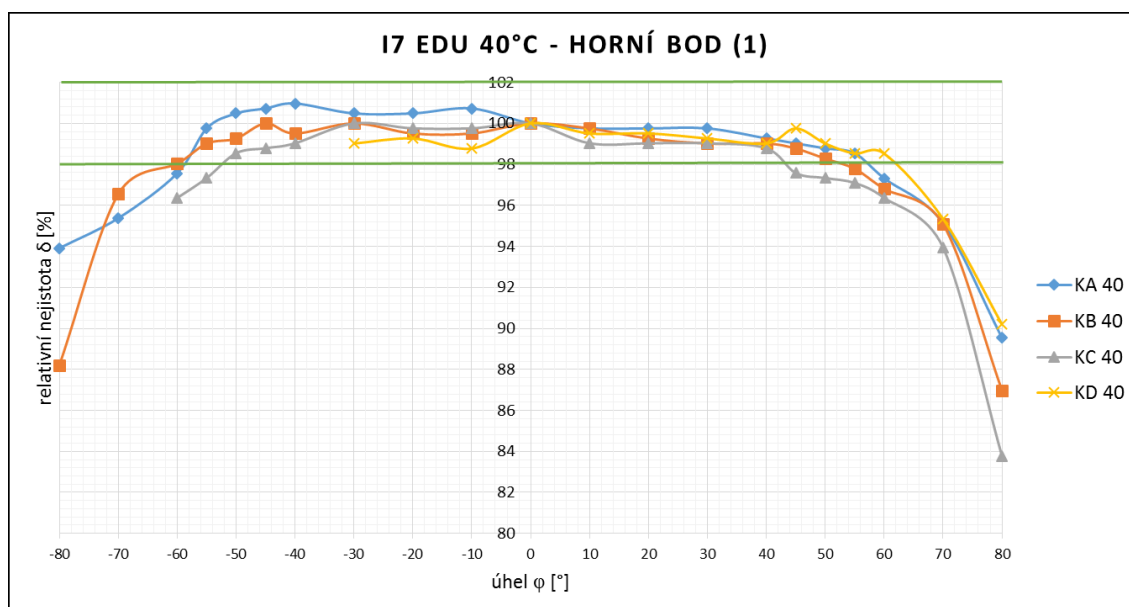
Přesnost: $\pm 3,9\%$ 

obr. 6.1.-11 – Minolta 80 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2,7\%$

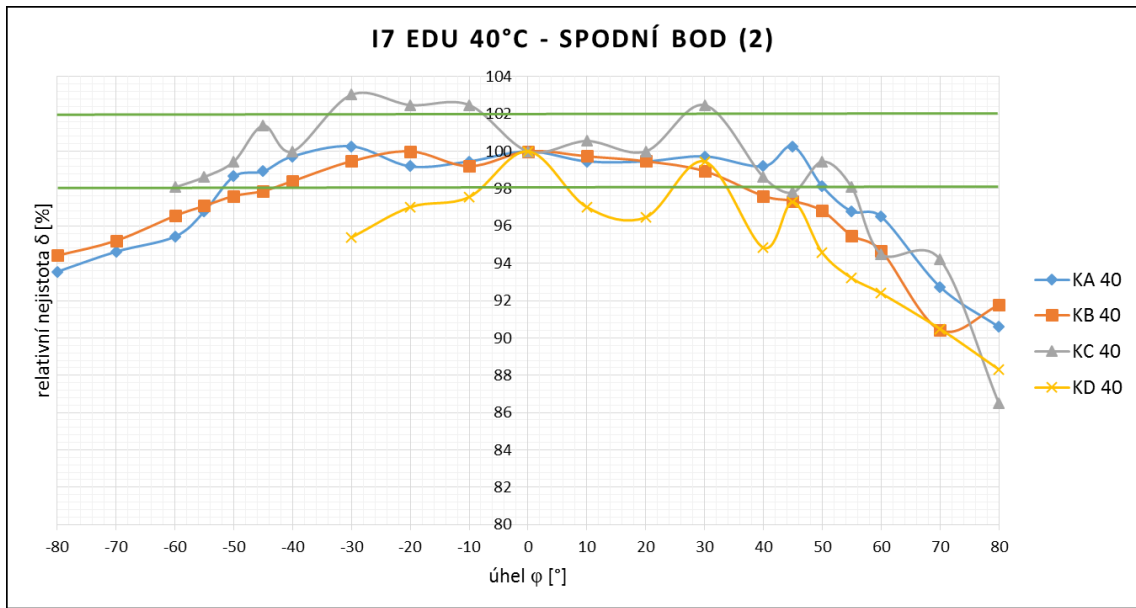


obr. 6.1.-12 – Minolta 80 °C, bod 2

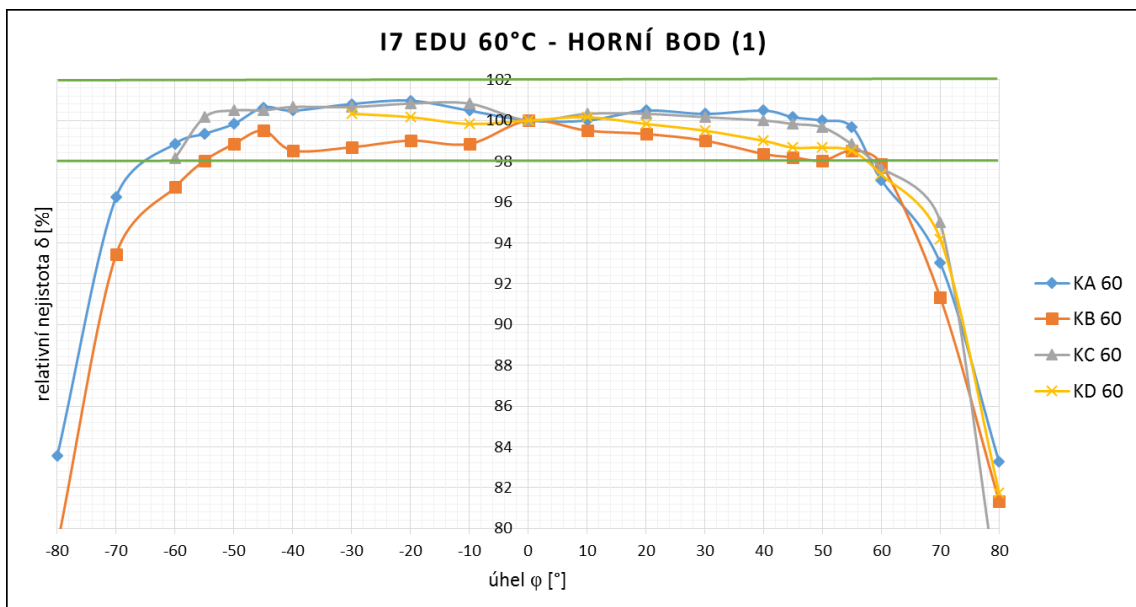
Přesnost: $\pm 3\%$ **6.1.3. Flir i7 EDU**

obr. 6.1.-13 – i7 EDU, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

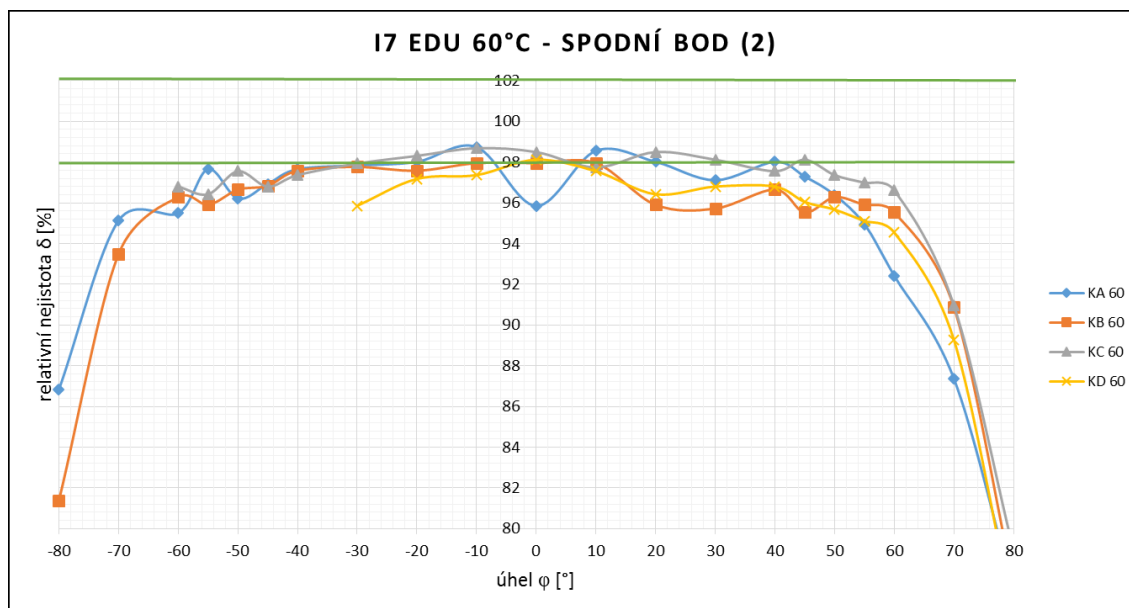
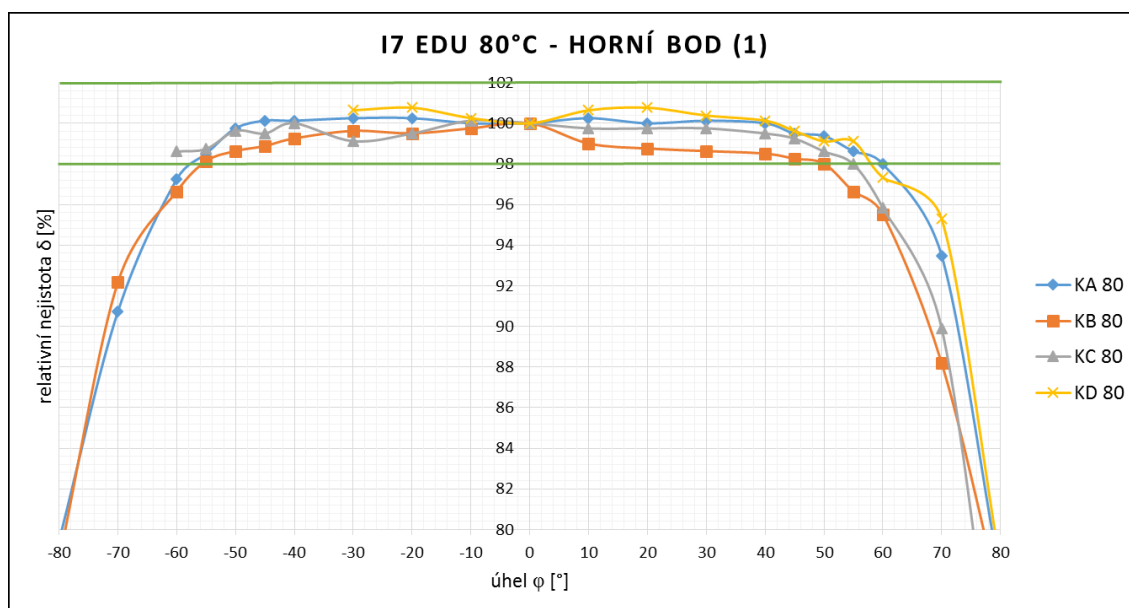


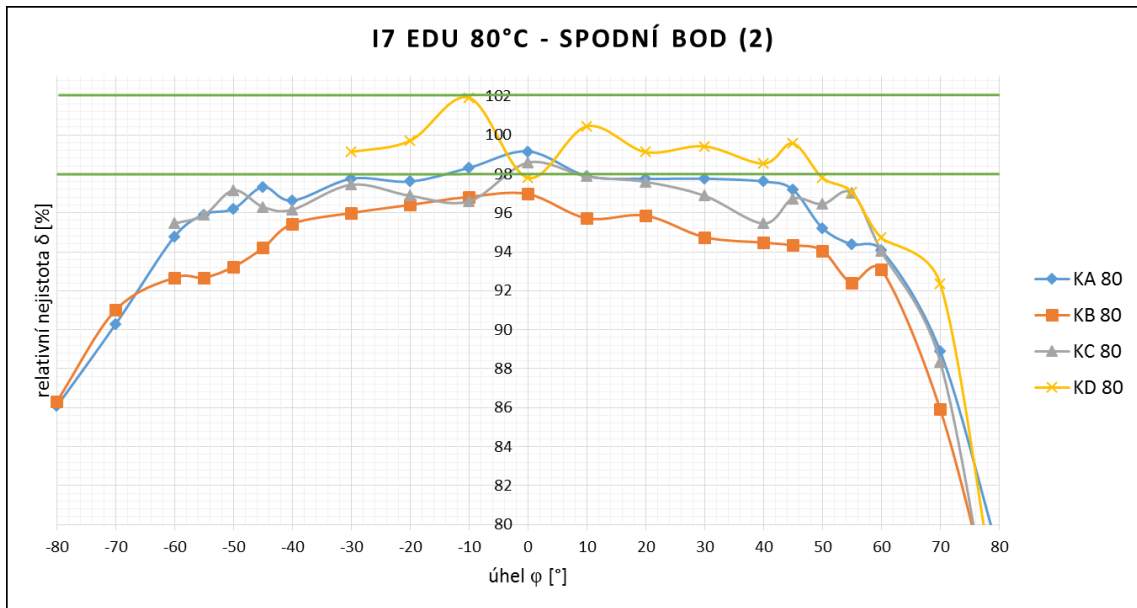
obr. 6.1.-14 – i7 EDU, 40 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$ 

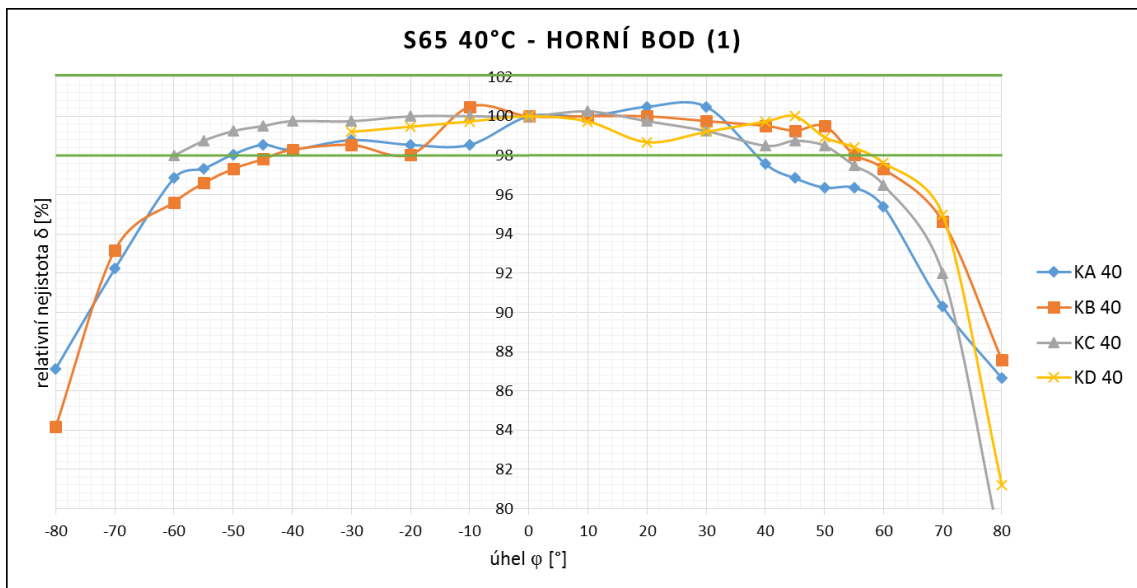
obr. 6.1.-15 – i7 EDU, 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

obr. 6.1.-16 – *i7* EDU, 60 °C, bod 2Přesnost: $\pm 2\%$ obr. 6.1.-17 – *i7* EDU, 80 °C, bod 1Přesnost: $\pm 2\%$

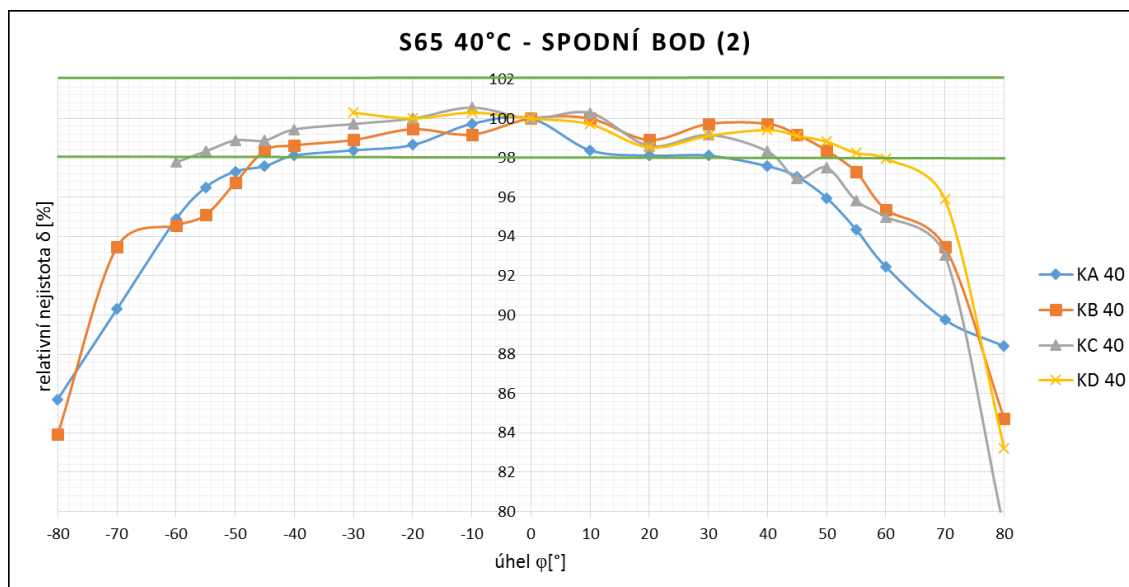


obr. 6.1.-18 – i7 EDU, 80 °C, bod 2

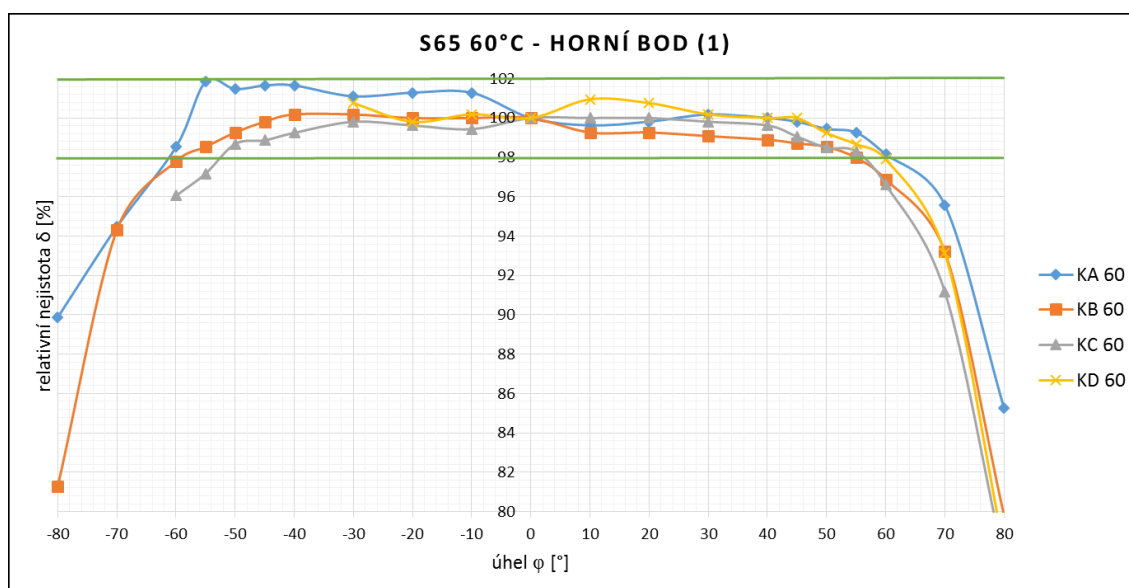
Přesnost: $\pm 2\%$ **6.1.4. Flir S65**

obr. 6.1.-19 – S65, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

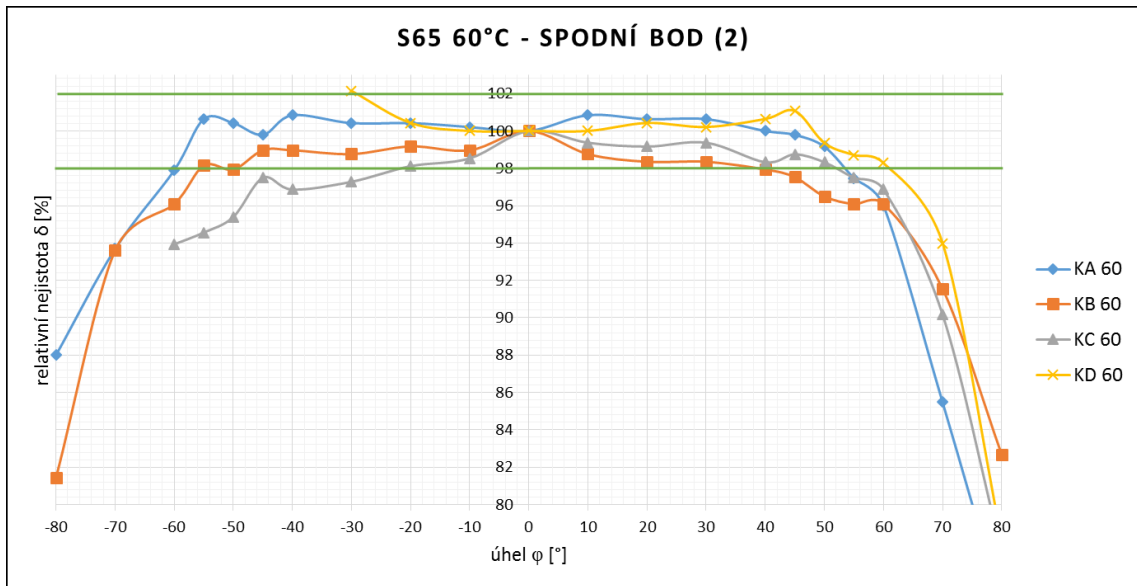


obr. 6.1.-20 – S65, 40 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$ 

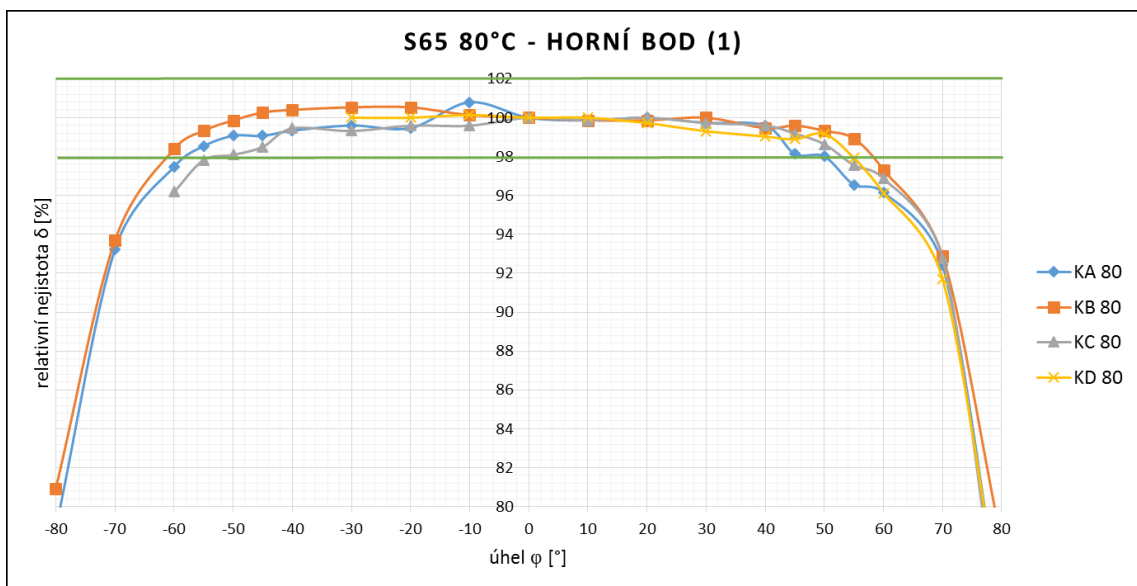
obr. 6.1.-21 – S65, 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$



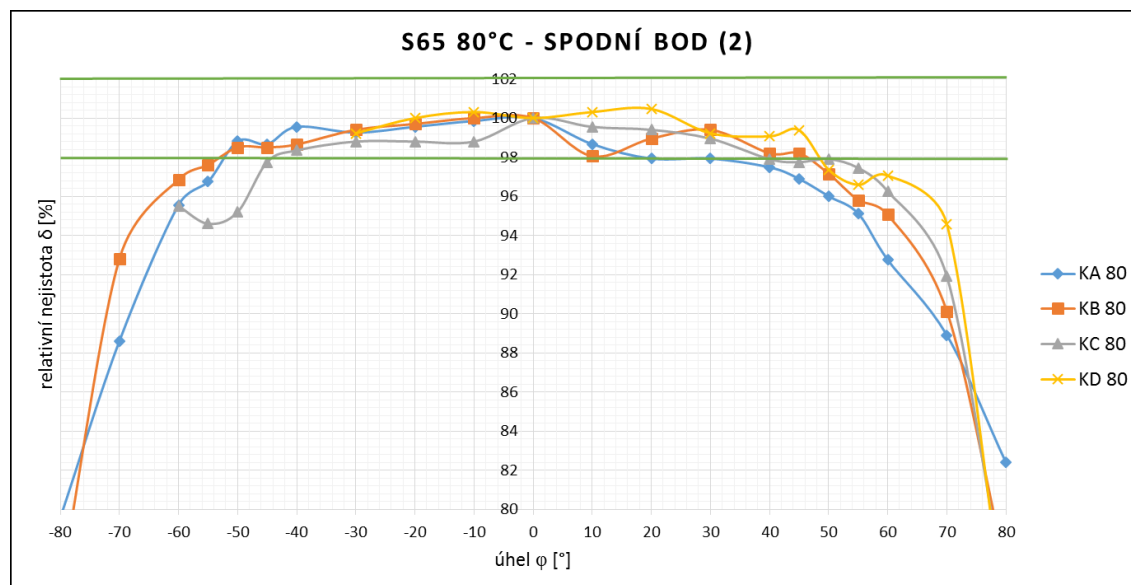
obr. 6.1.-22 – S65, 60 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$

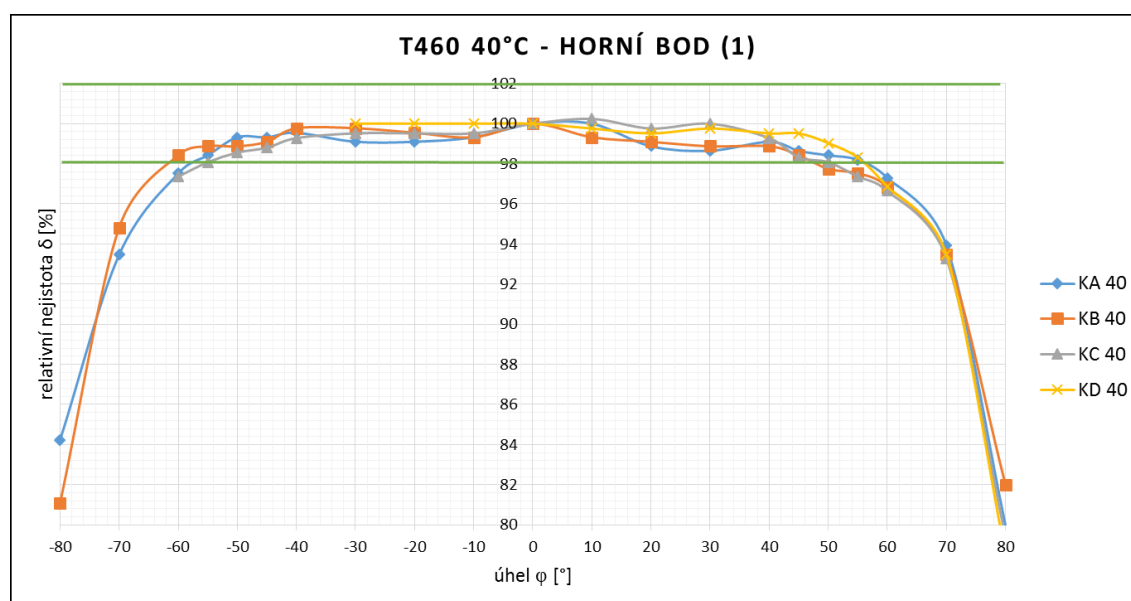


obr. 6.1.-23 – S65, 80 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

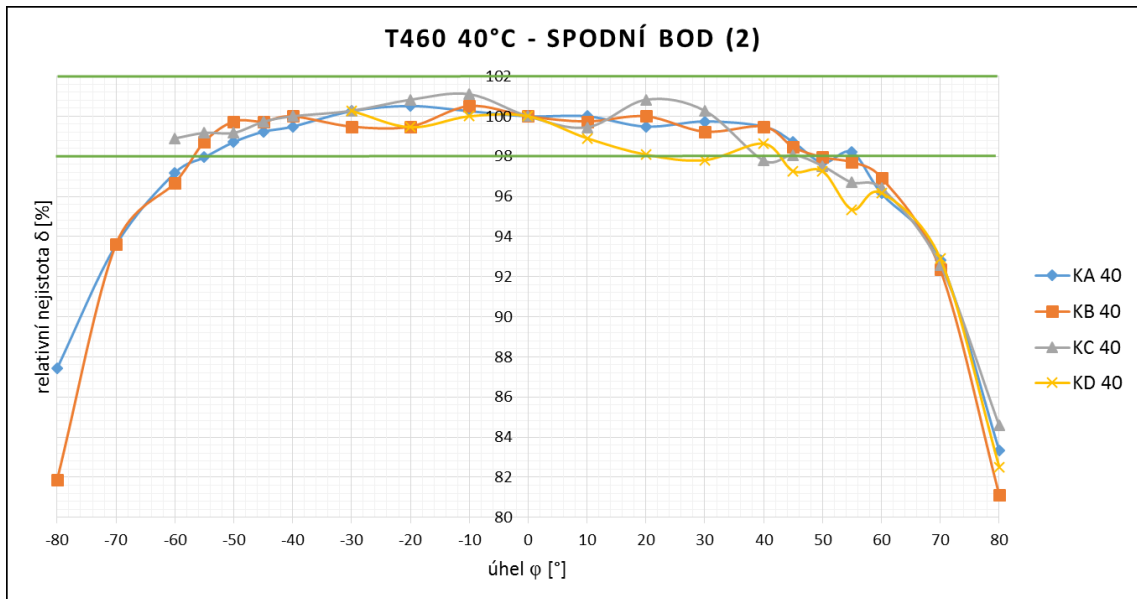


obr. 6.1.-24 – S65, 80 °C, bod 2

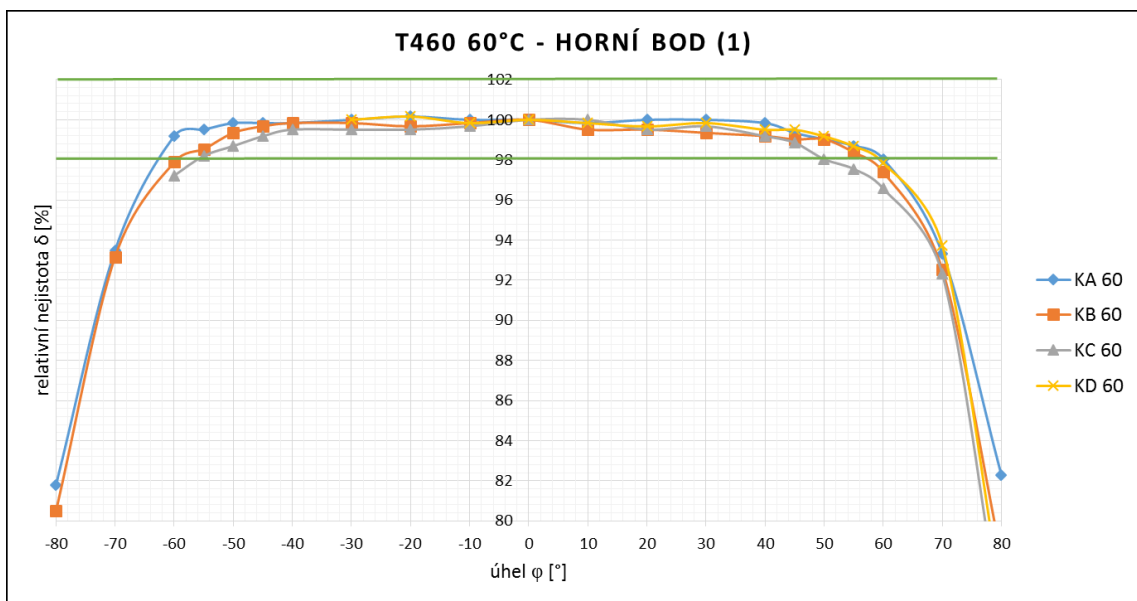
Přesnost: $\pm 2\%$ **6.1.5. Flir T460**

obr. 6.1.-25 – T460, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

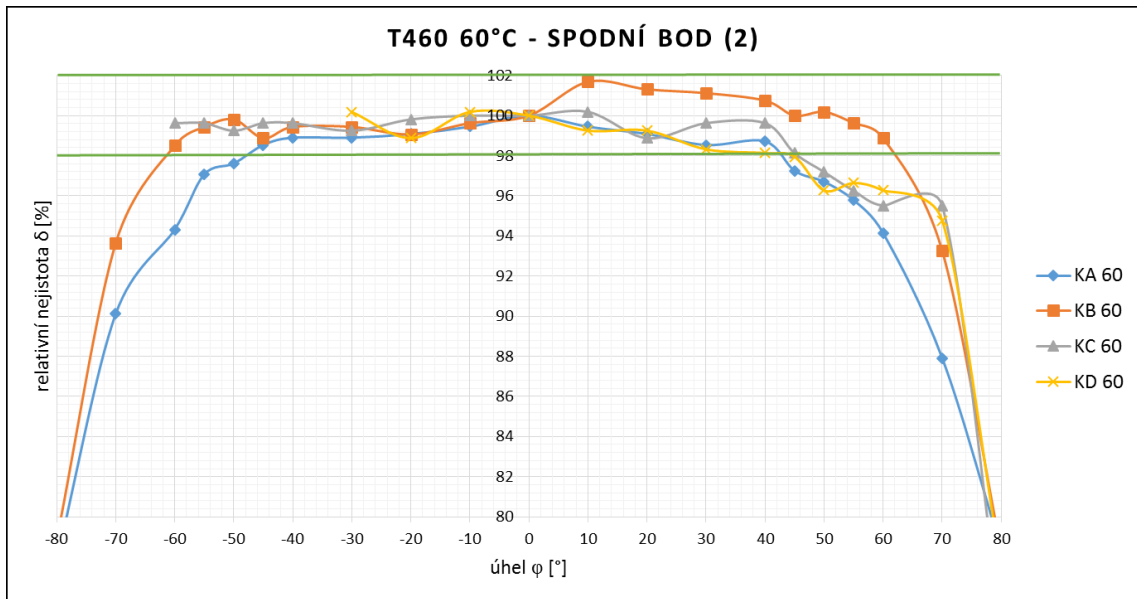


obr. 6.1.-26 – T460, 40 °C, bod 2

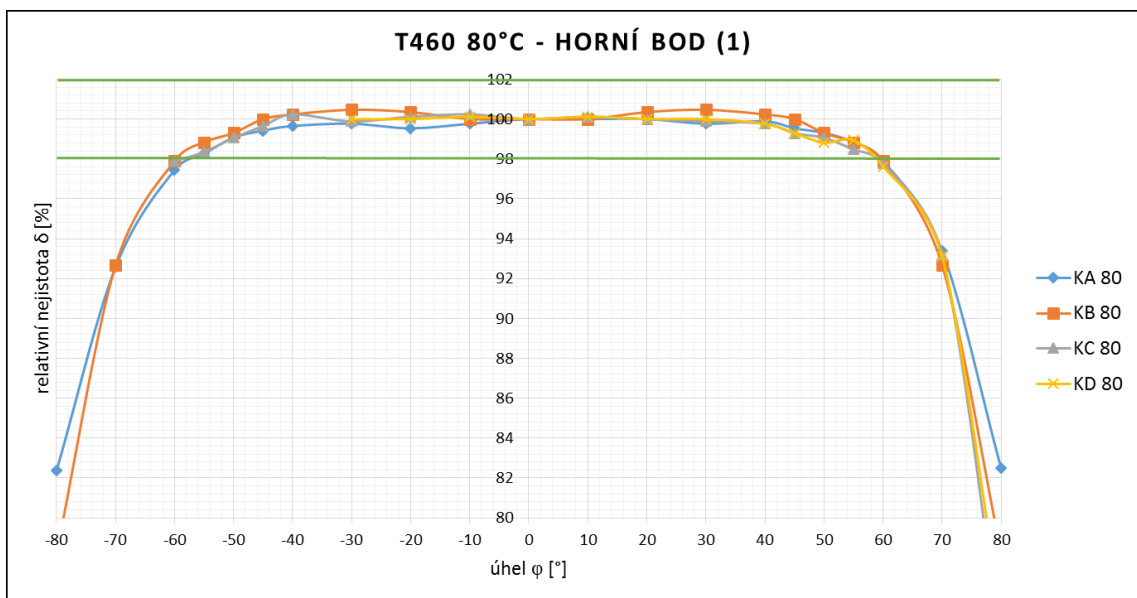
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.1.-27 – T460, 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

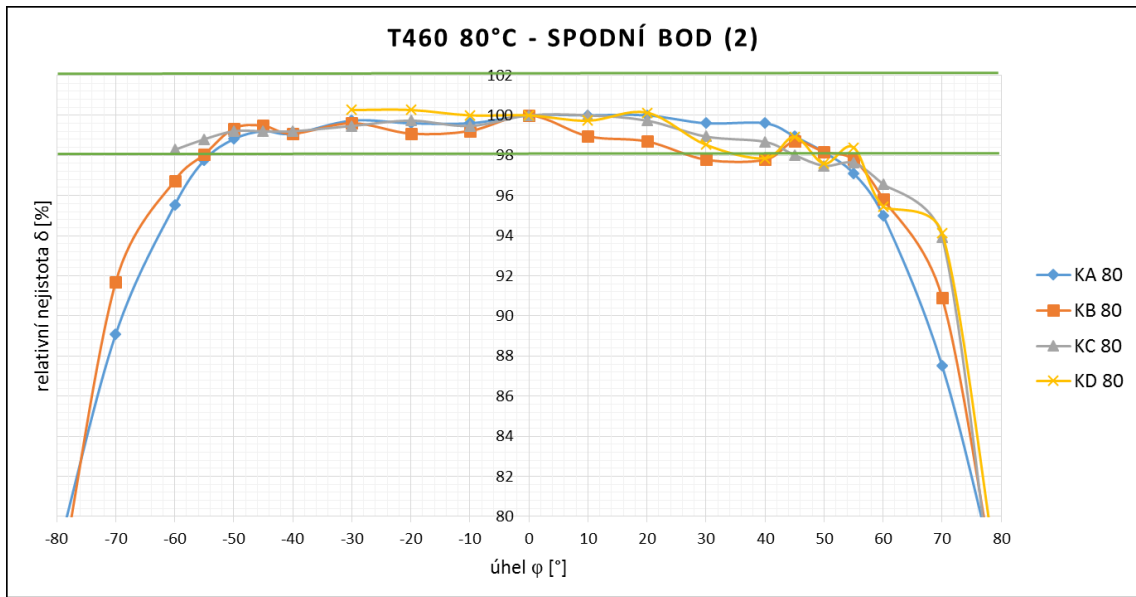


obr. 6.1.-28 – T460, 60 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.1.-29 – T460, 80 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

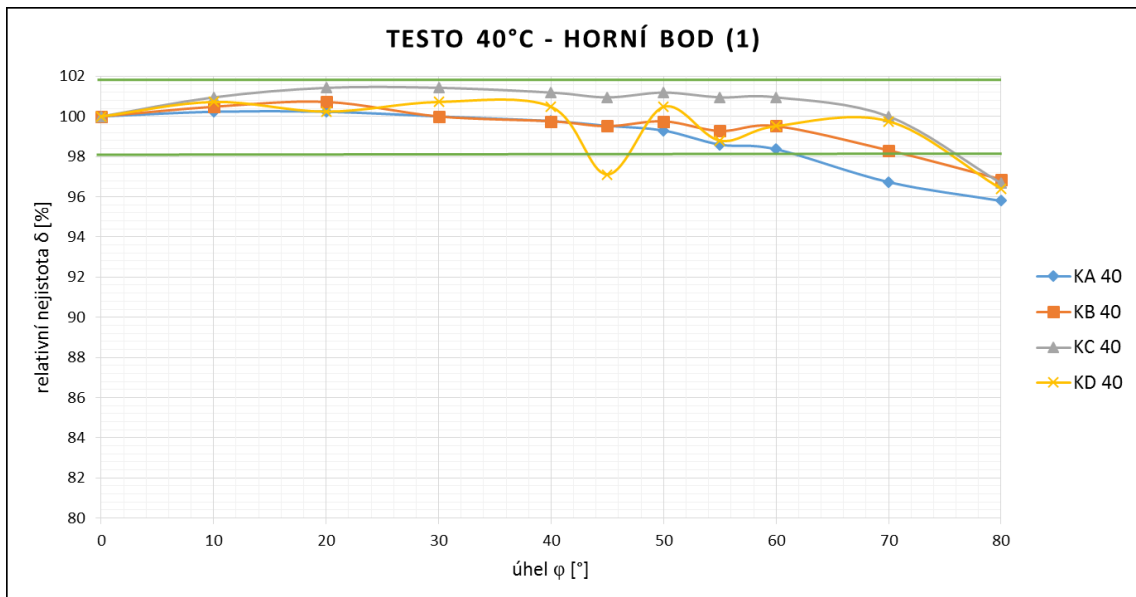


obr. 6.1.-30 – T460, 80 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$

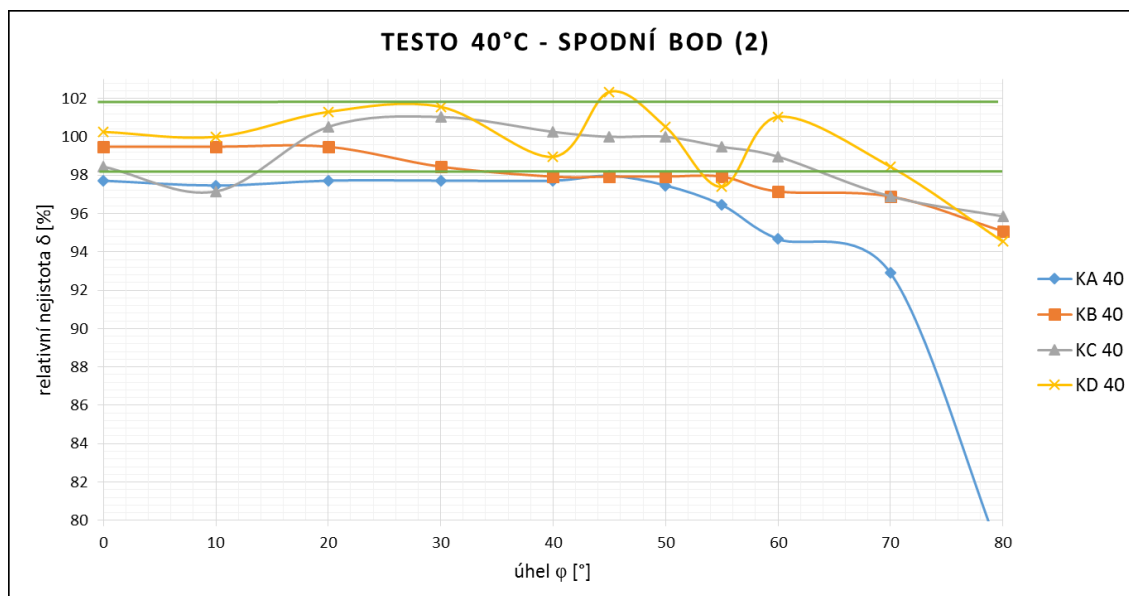
6.2. Článekové otopné těleso

6.2.1. Testo QuickTemp 860-T2

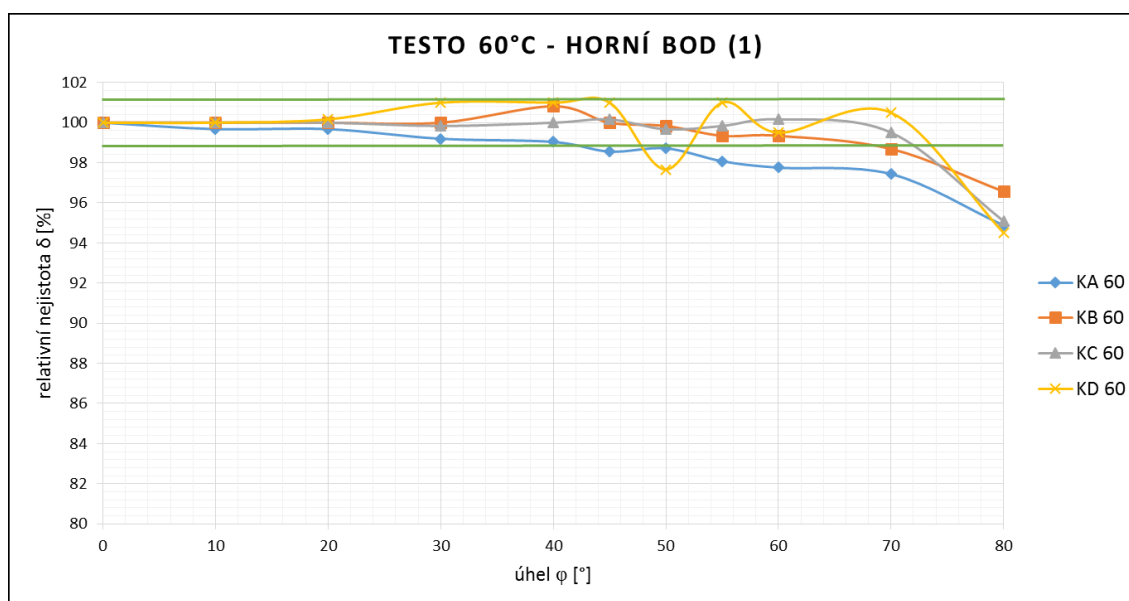


obr. 6.2.-1 – Testo, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 1,9\%$

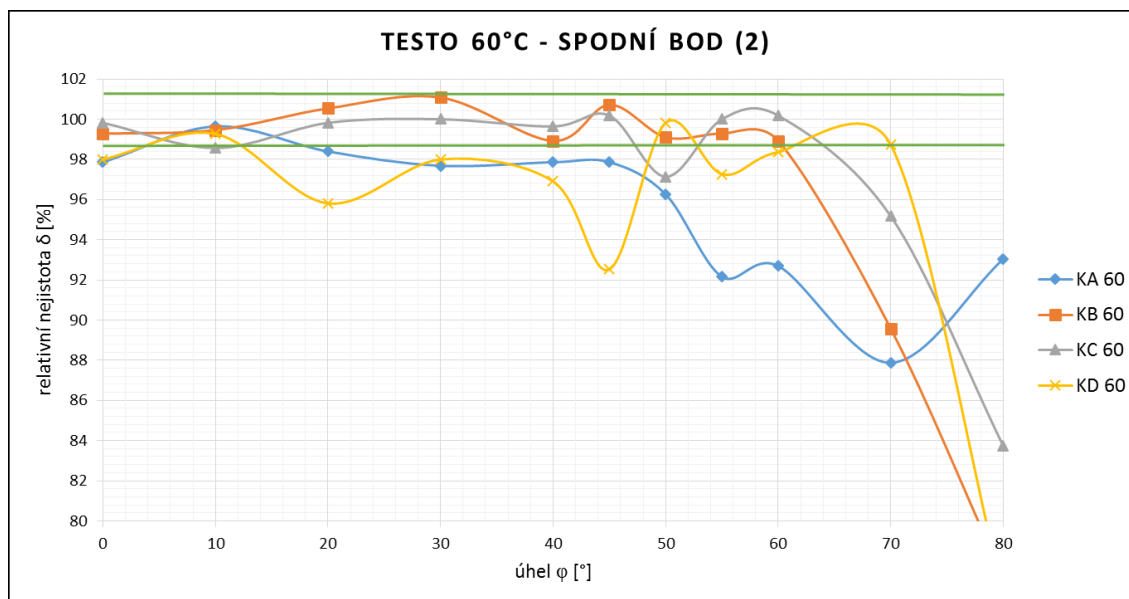


obr. 6.2.-2 – Testo, 40 °C, bod 2

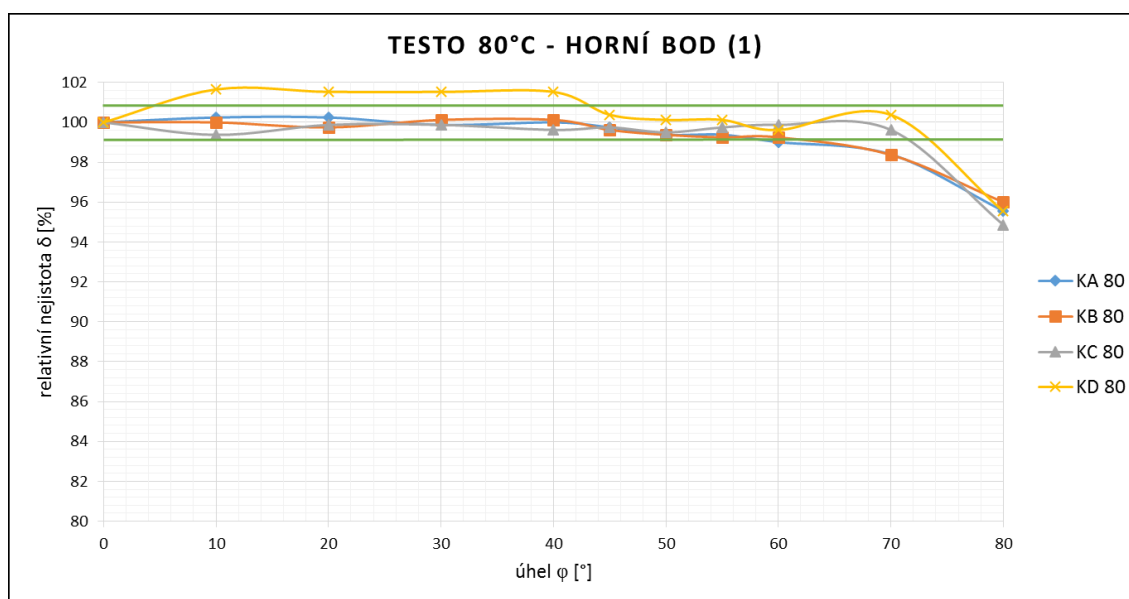
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-3 – Testo, 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 1,3\%$

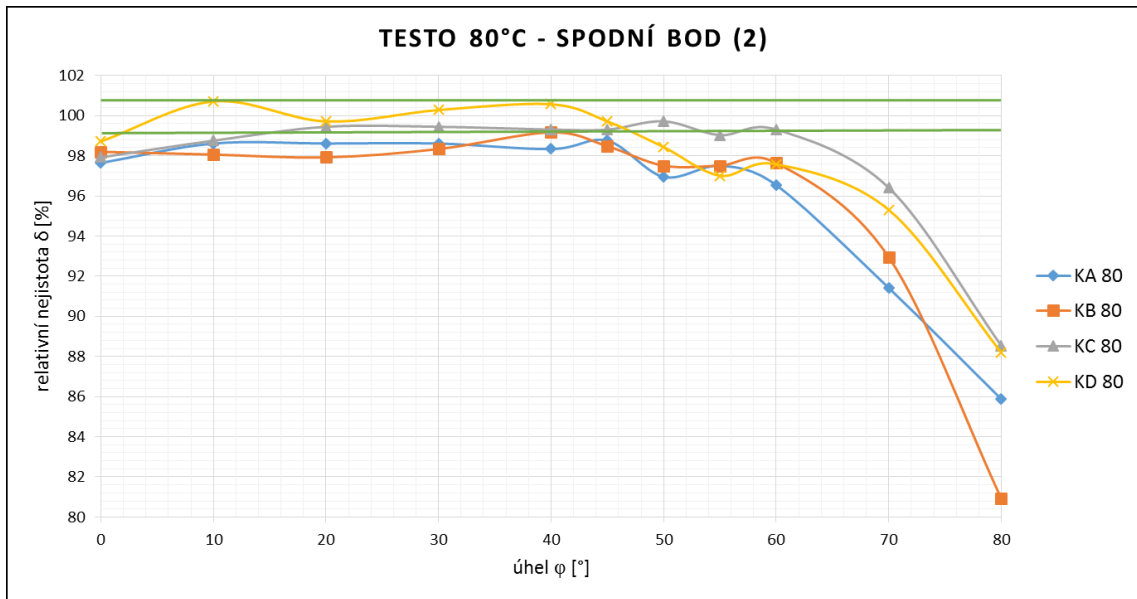


obr. 6.2.-4 – Testo, 60 °C, bod 2

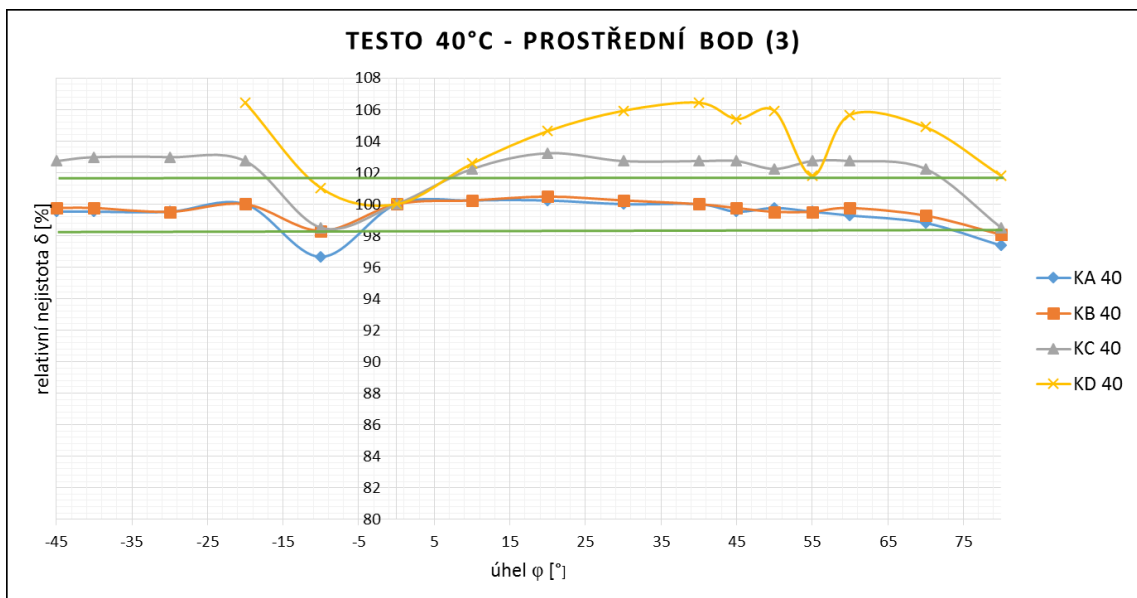
Přesnost: $\pm 1,4\%$ 

obr. 6.2.-5 – Testo, 80 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 0,75\%$

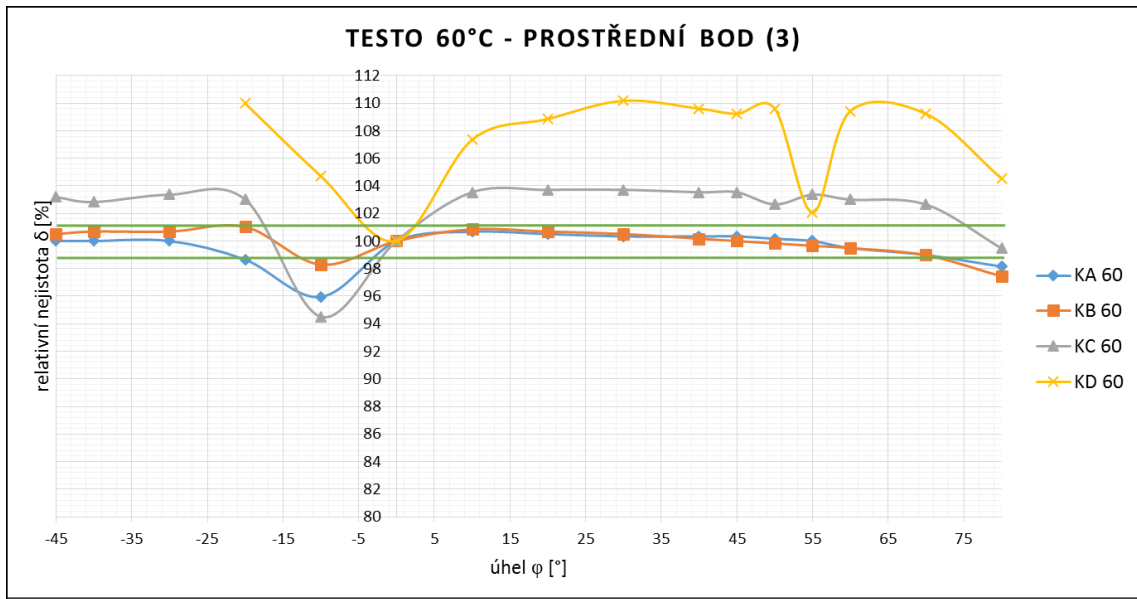


obr. 6.2.-6 – Testo, 80 °C, bod 2

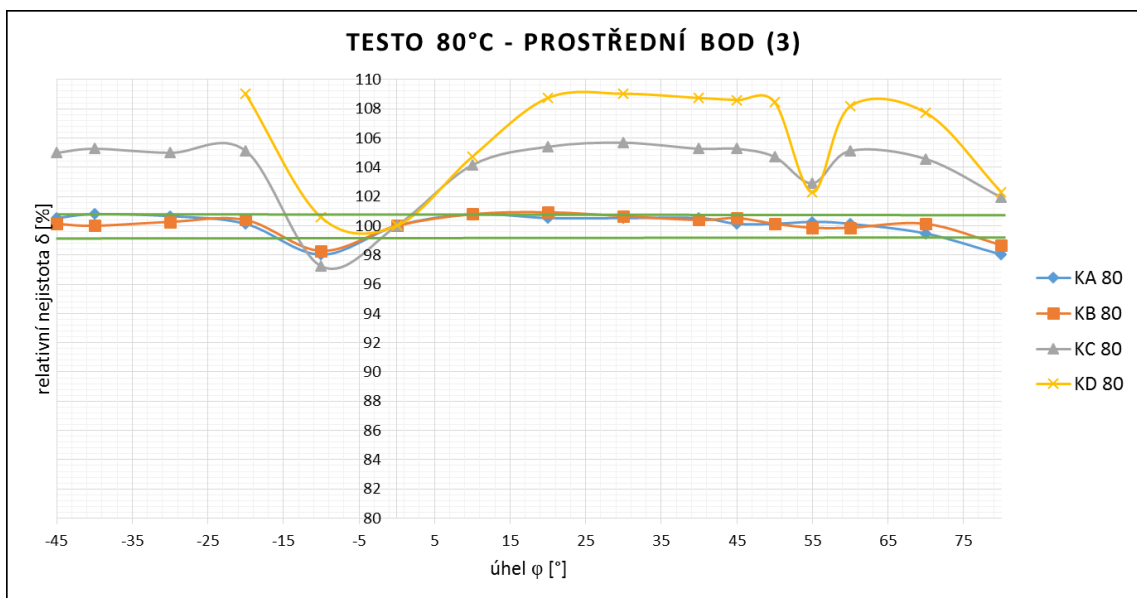
Přesnost: $\pm 0,75\%$ **Bod 3:**

obr. 6.2.-7 – Testo, 40 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 1,9\%$



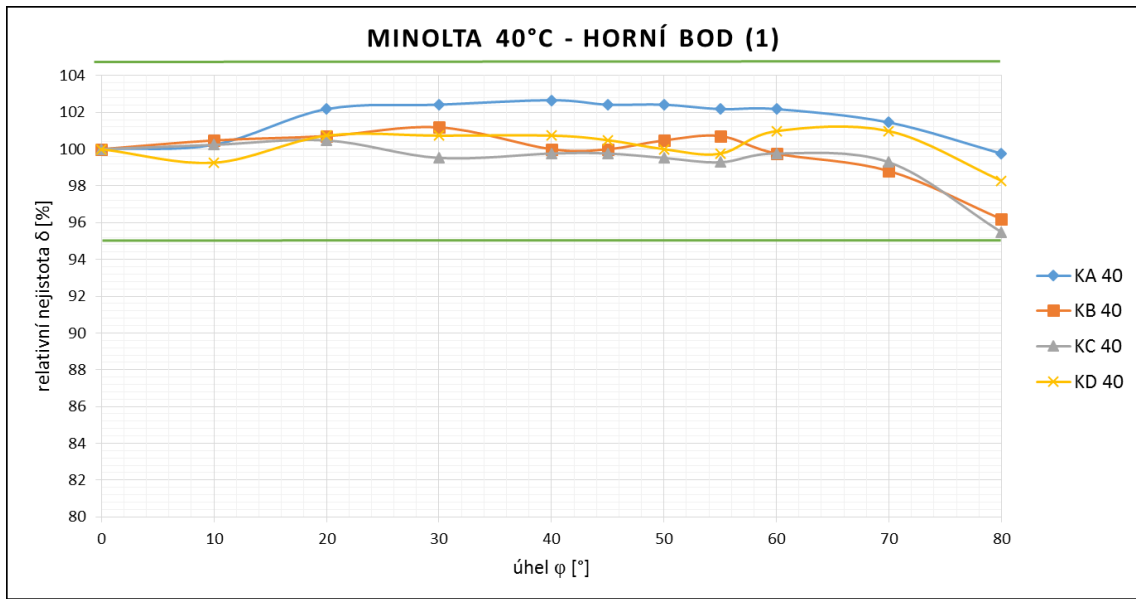
obr. 6.2.-8 – Testo, 60 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 1,4\%$ 

obr. 6.2.-9 – Testo, 80 °C, bod 3

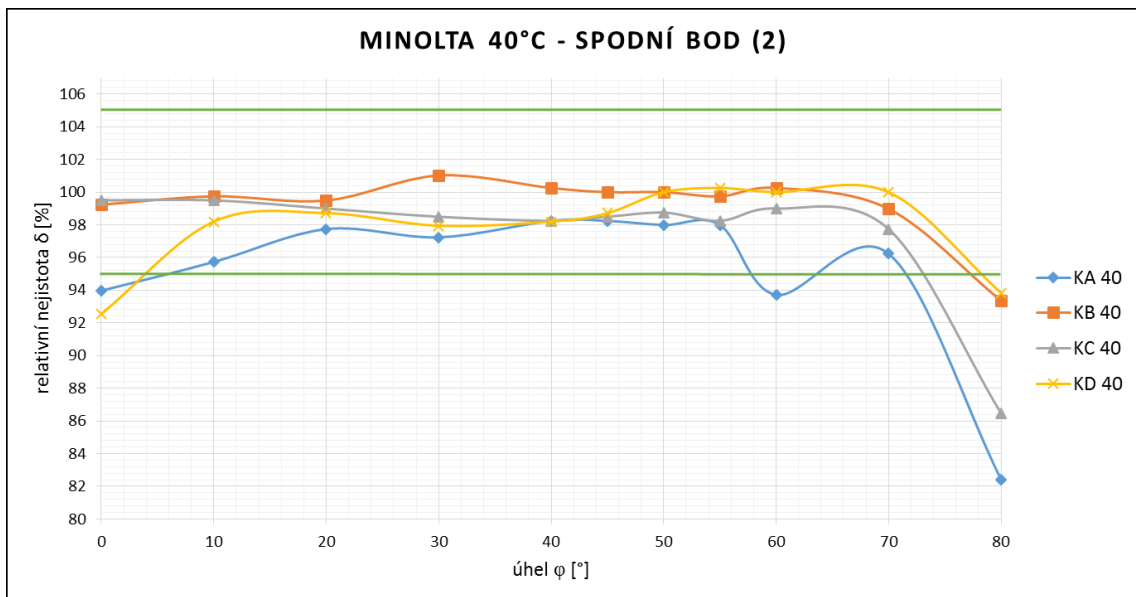
Přesnost: $\pm 0,75\%$

6.2.2. Minolta Land Cyclops Mini View



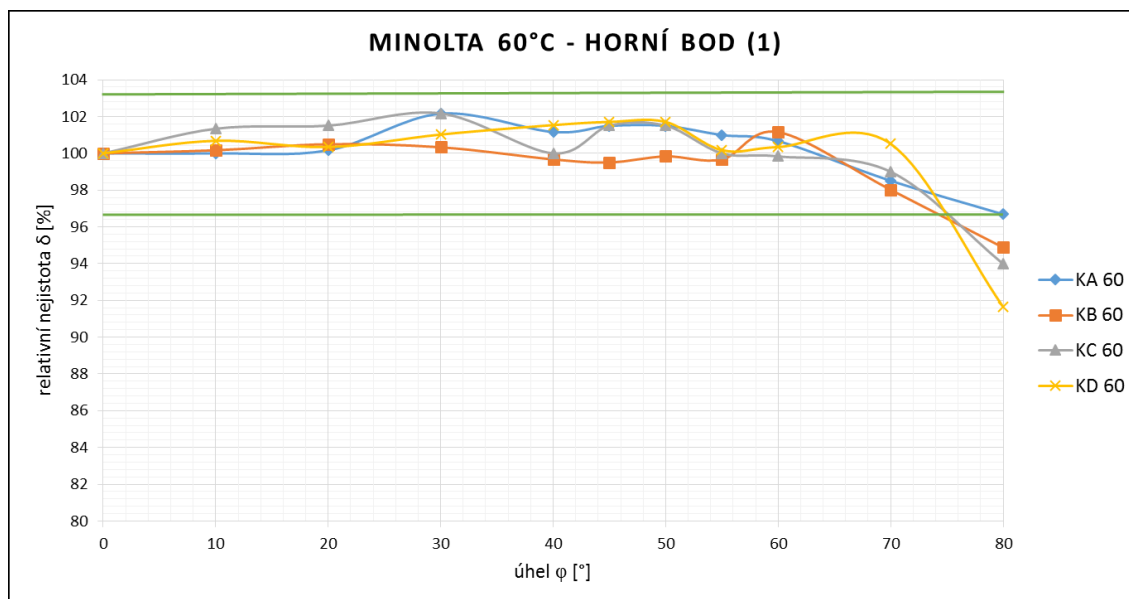
obr. 6.2.-10 – Minolta, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 5\%$

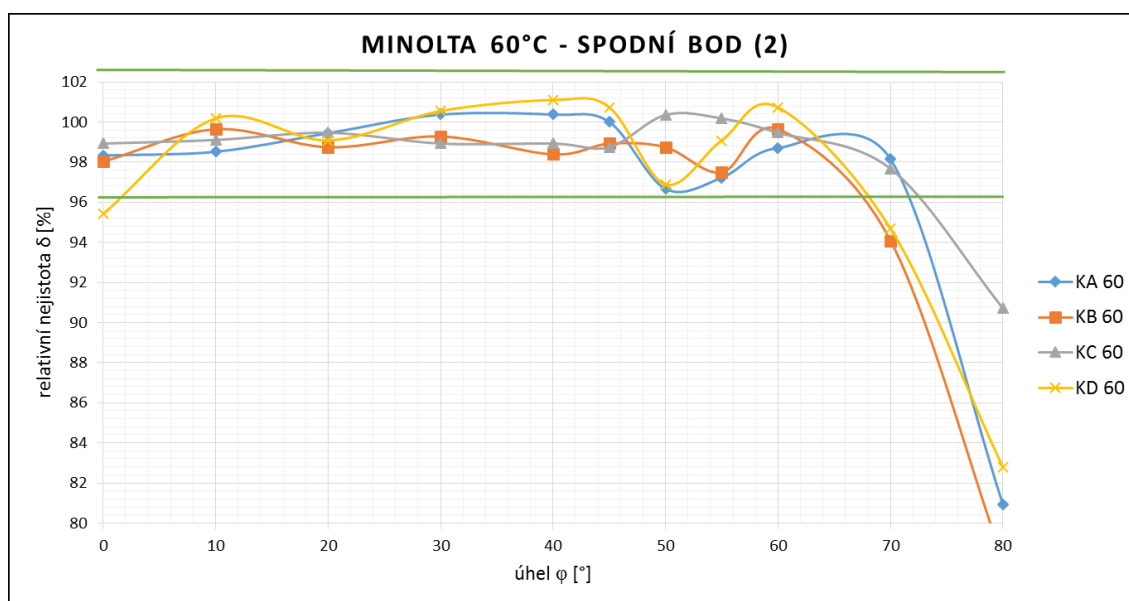


obr. 6.2.-11 – Minolta, 40 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 5\%$

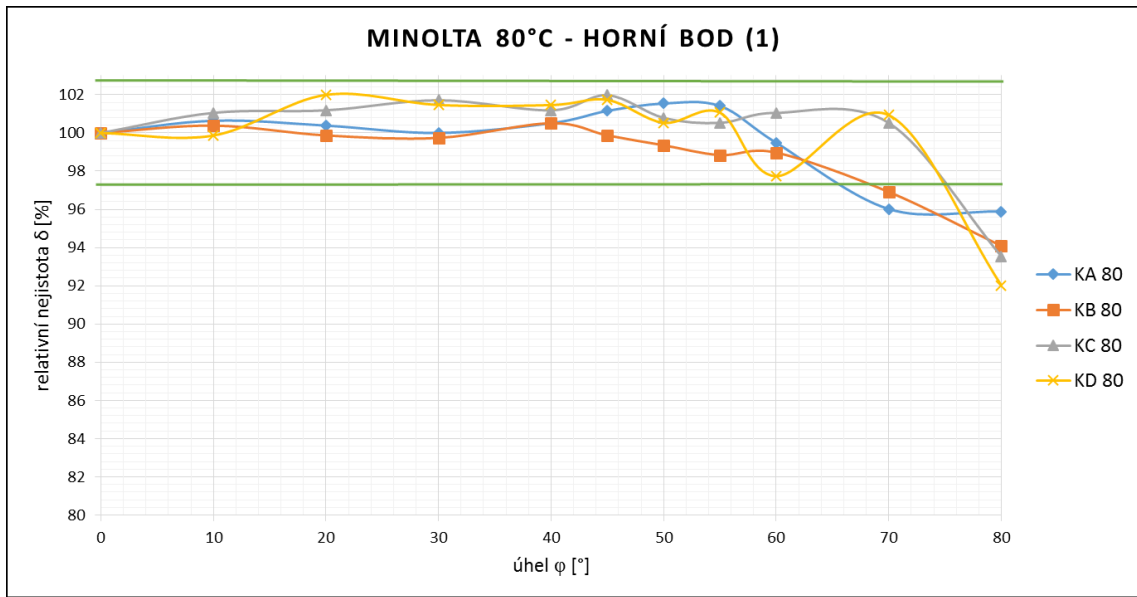


obr. 6.2.-12 – Minolta, 60 °C, bod 1

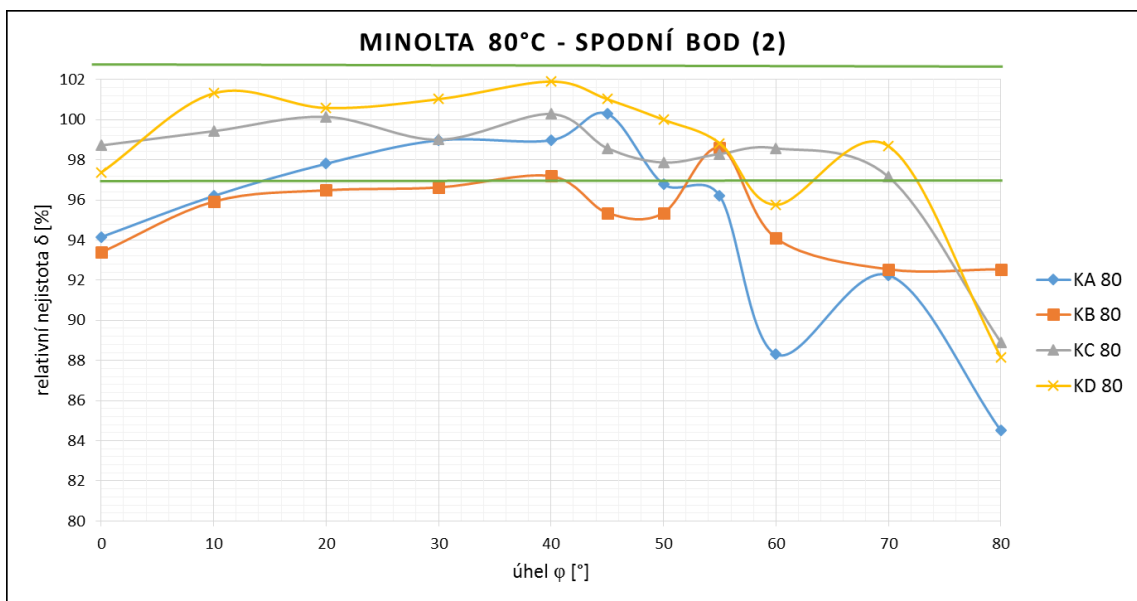
Přesnost: $\pm 3,4\%$ 

obr. 6.2.-13 – Minolta, 60 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 3,8\%$

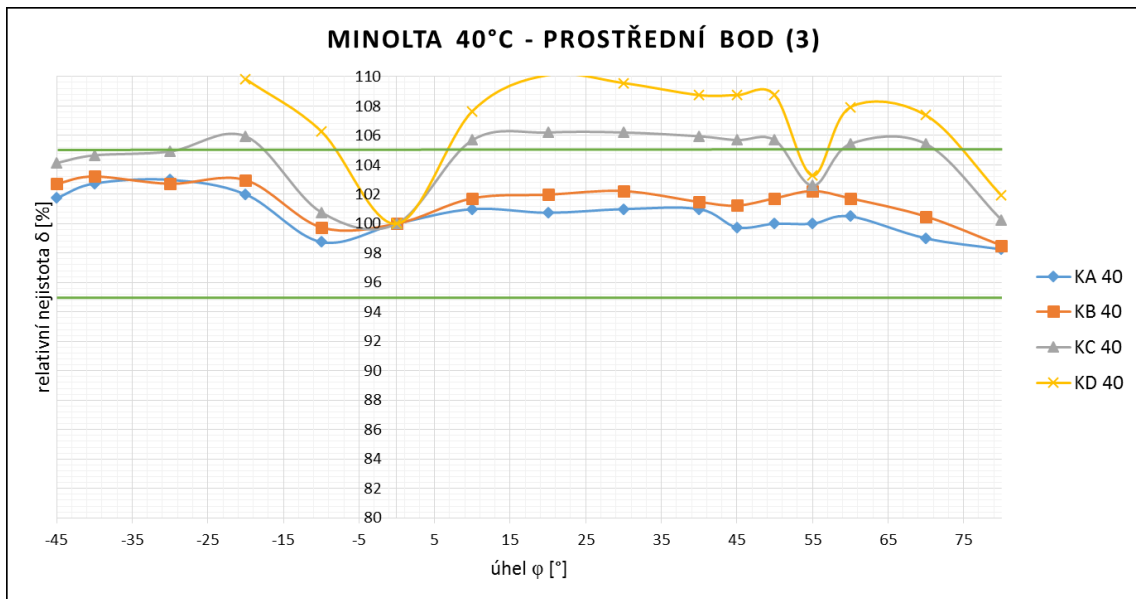


obr. 6.2.-14 – Minolta, 80 °C, bod 1

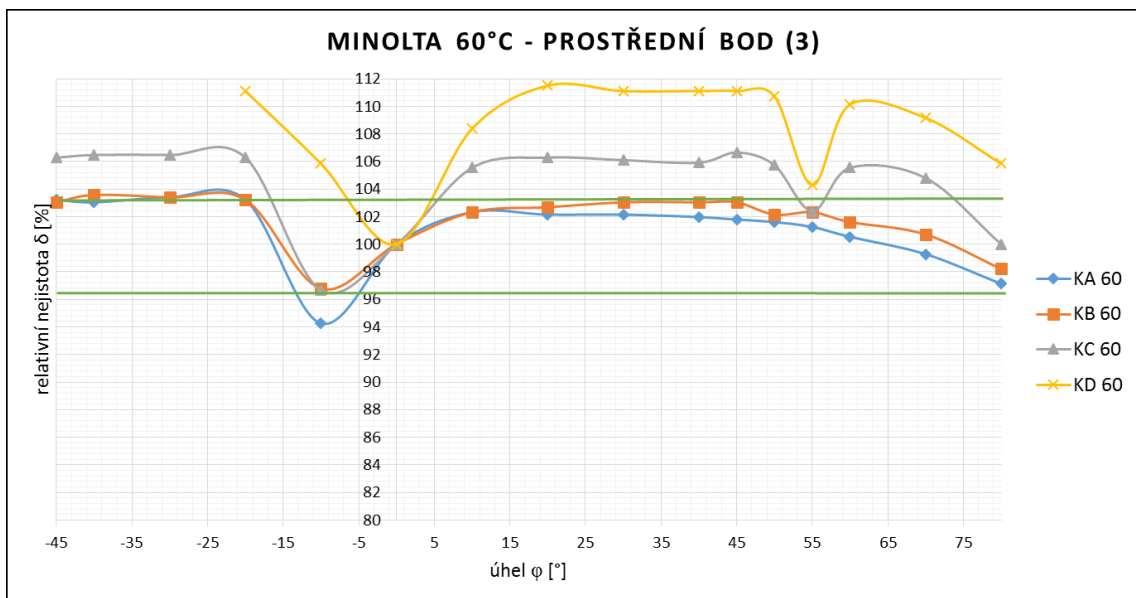
Přesnost: $\pm 2,7\%$ 

obr. 6.2.-15 – Minolta, 80 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 3\%$

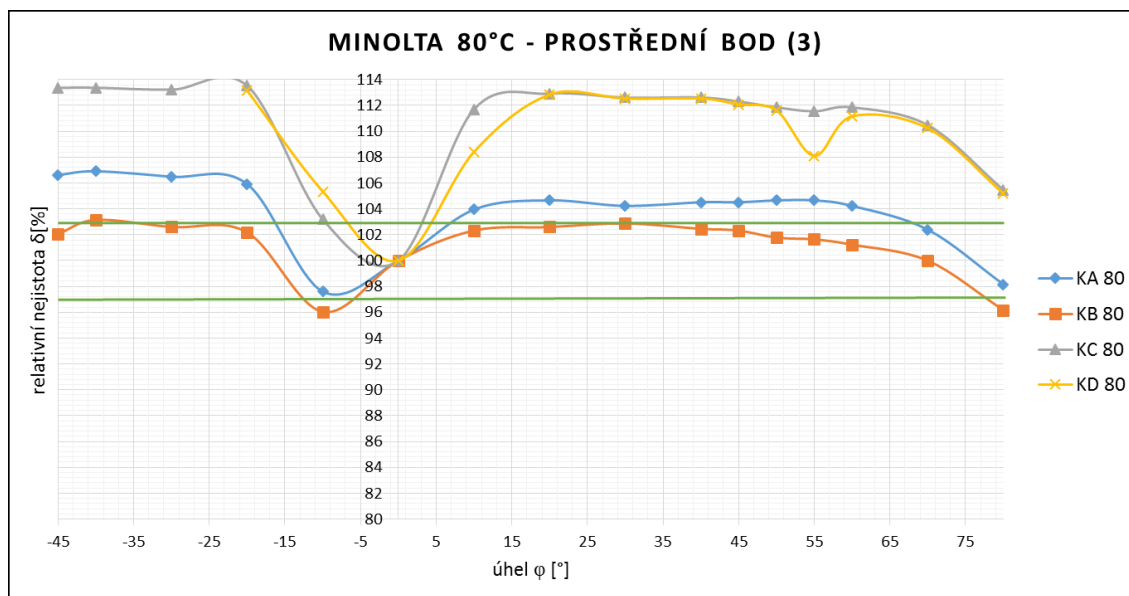
Bod 3:

obr. 6.2.-16 – Minolta, 40 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 5\%$ 

obr. 6.2.-17 – Minolta, 60 °C, bod 3

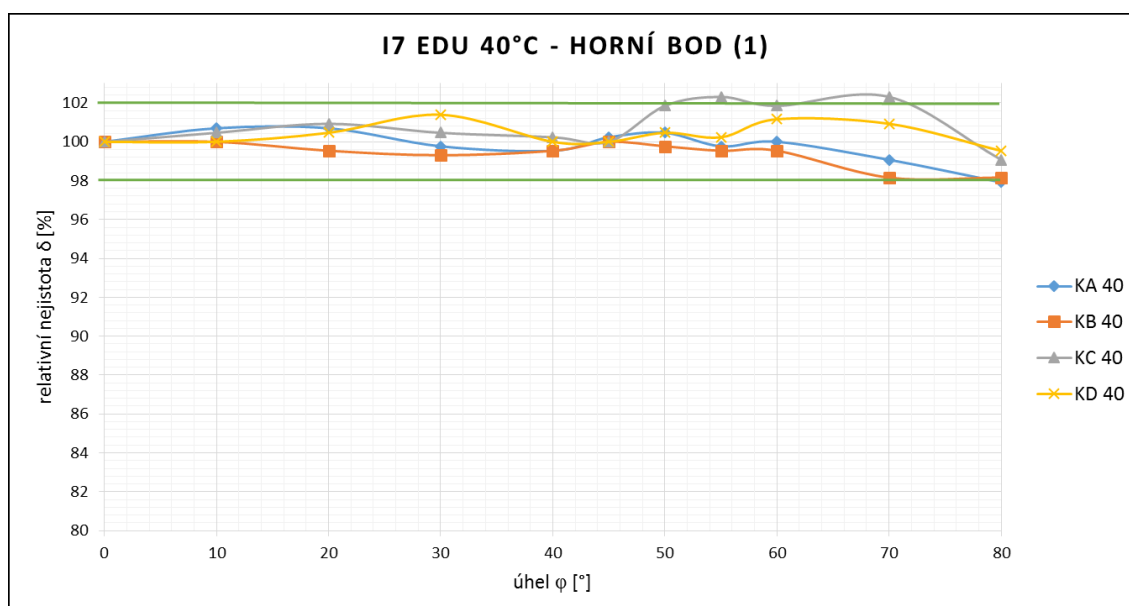
Přesnost: $\pm 3,7\%$



obr. 6.2.-18 – Minolta, 80 °C, bod 3

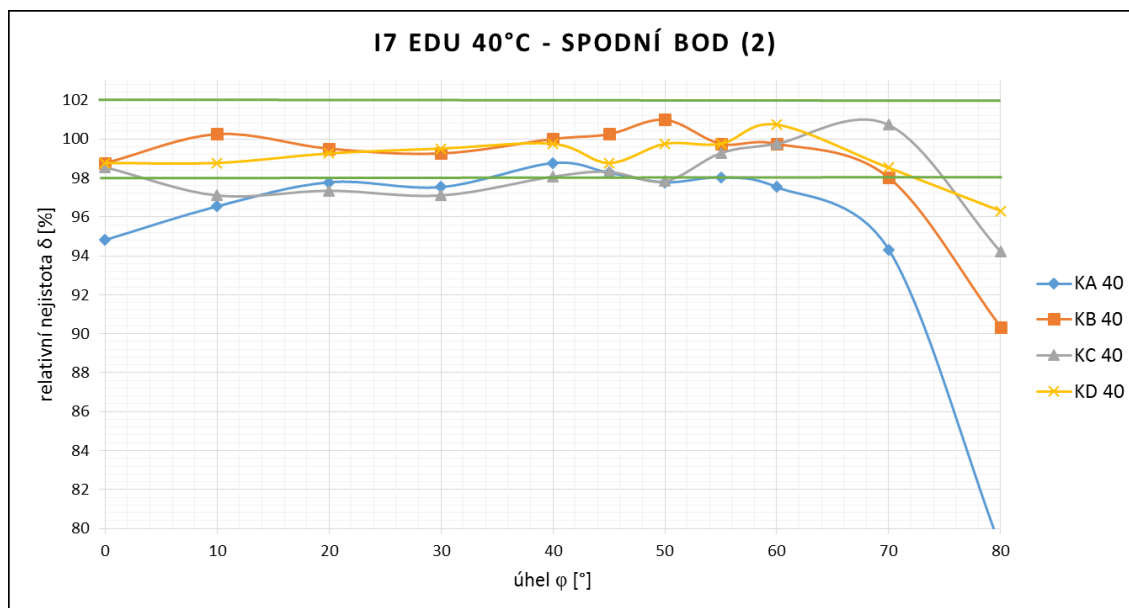
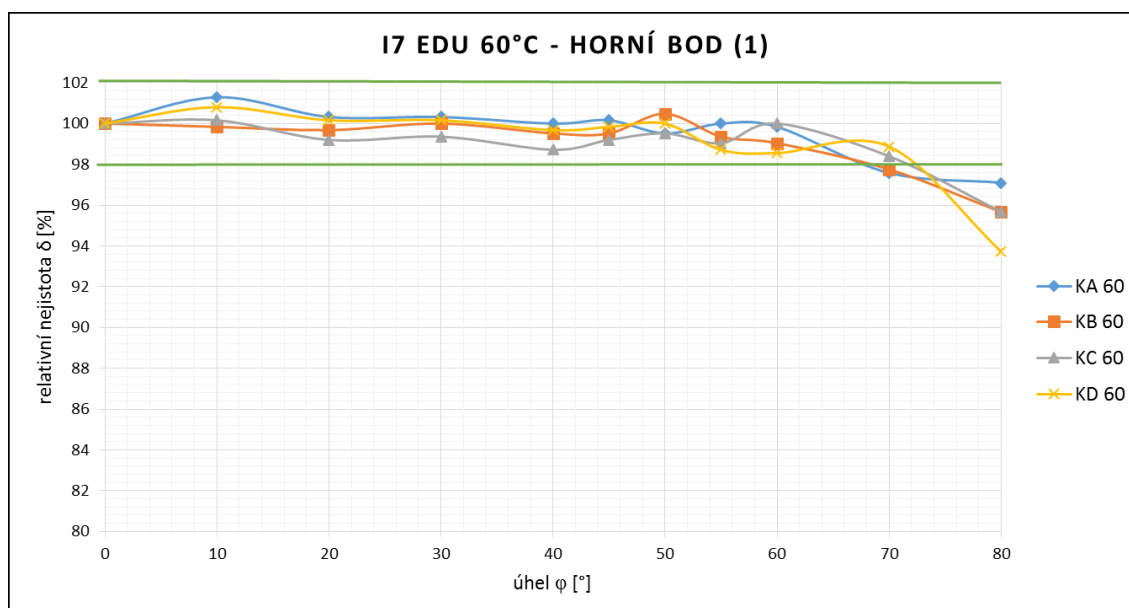
Přesnost: $\pm 2,9\%$

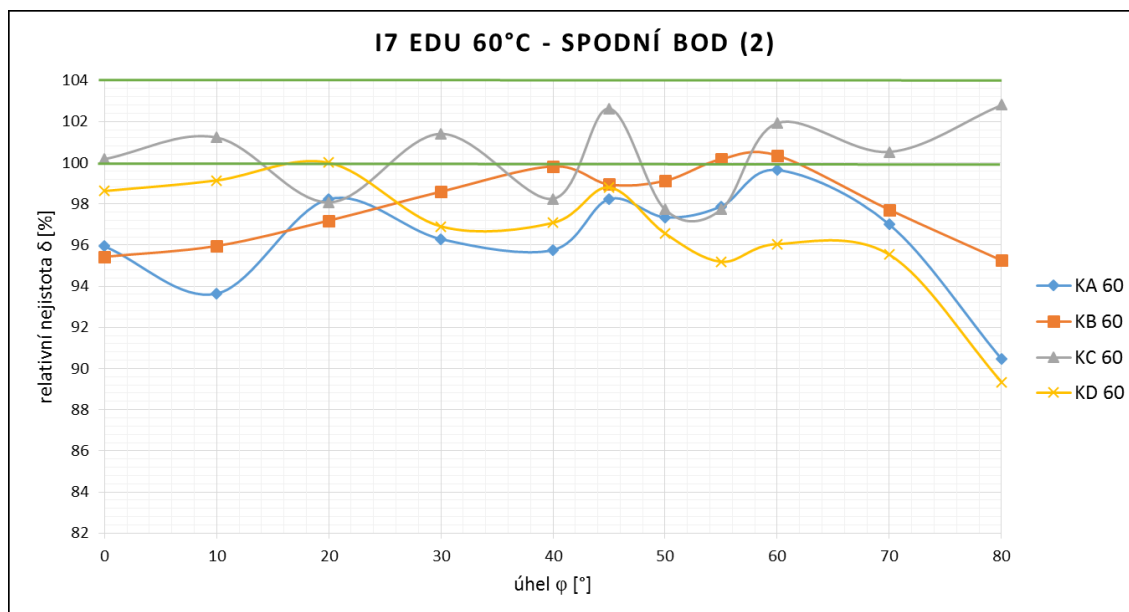
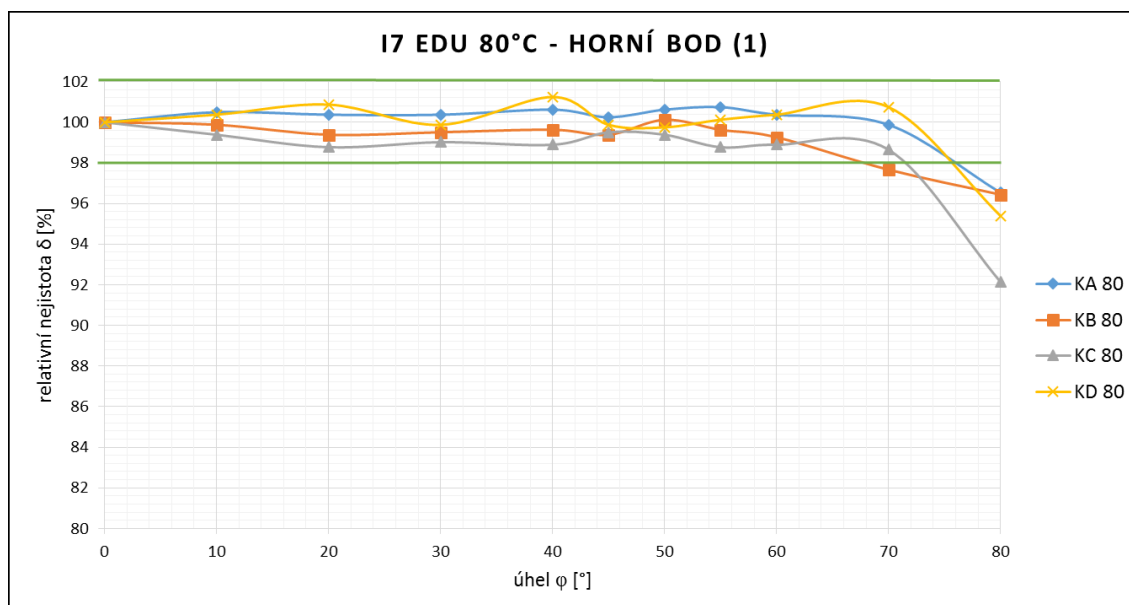
6.2.3. Flir i7 EDU

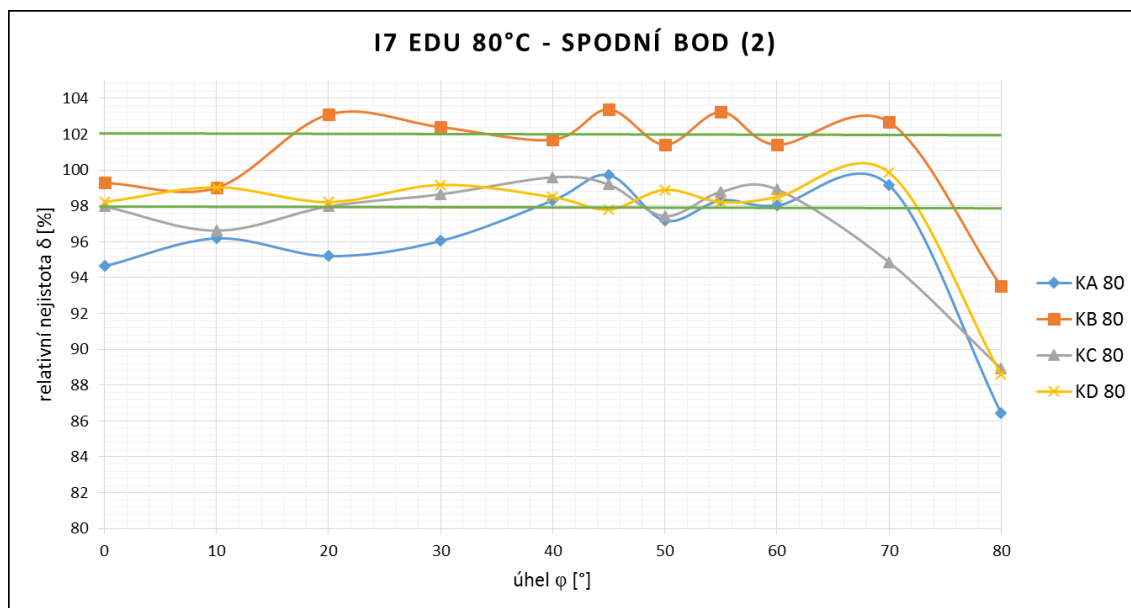
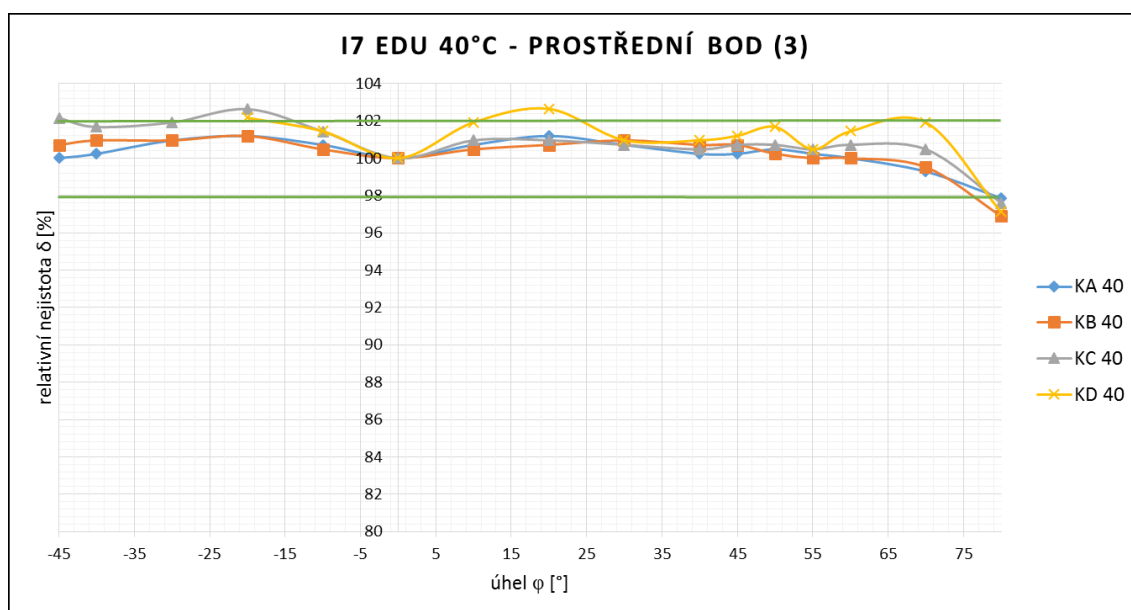


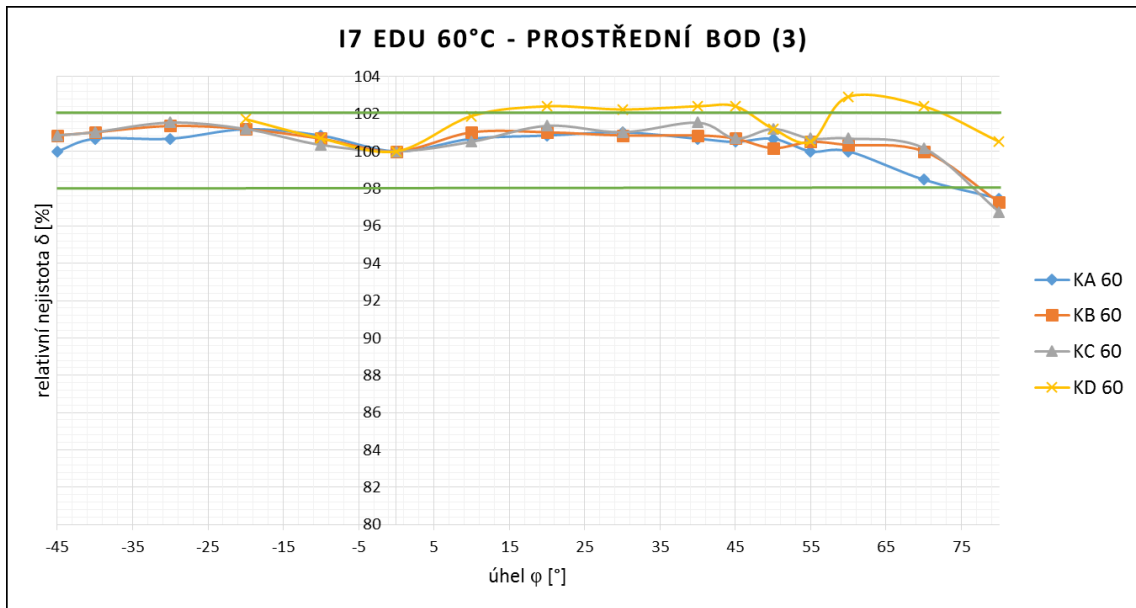
obr. 6.2.-19 – i7 EDU, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

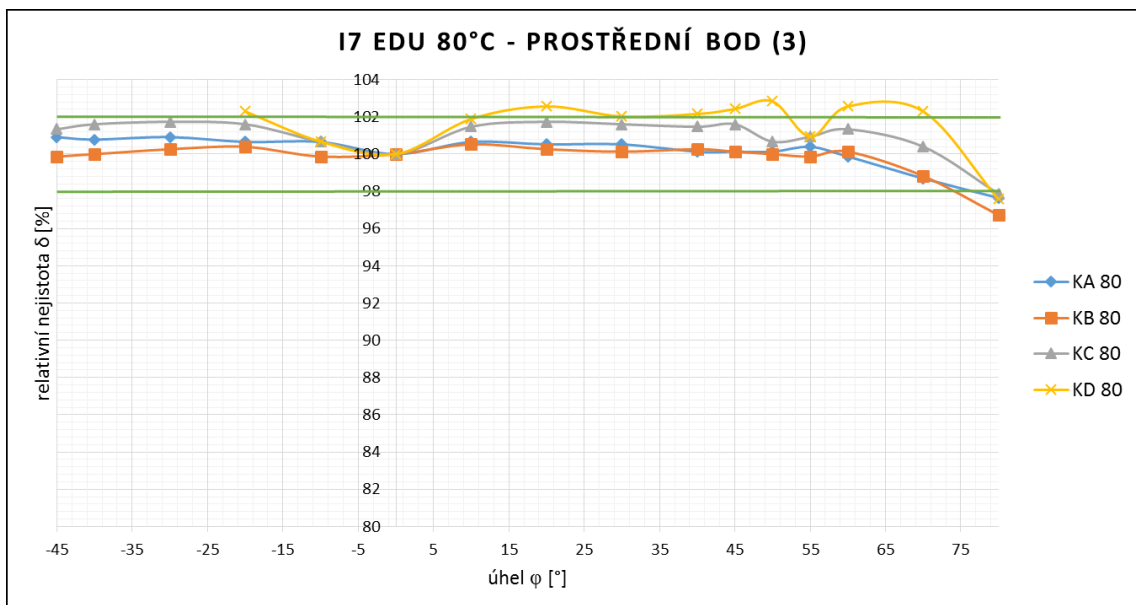
obr. 6.2.-20 – *i7* EDU, 40 °C, bod 2Přesnost: $\pm 2\%$ obr. 6.2.-21 – *i7* EDU, 60 °C, bod 1Přesnost: $\pm 2\%$

obr. 6.2.-22 – *i7* EDU, 60 °C, bod 2Přesnost: $\pm 2\%$ obr. 6.2.-23 – *i7* EDU, 80 °C, bod 1Přesnost: $\pm 2\%$

obr. 6.2.-24 – *i*7 EDU, 80 °C, bod 2Přesnost: $\pm 2\%$ **Bod 3:**obr. 6.2.-25 – *i*7 EDU, 40 °C, bod 3Přesnost: $\pm 2\%$



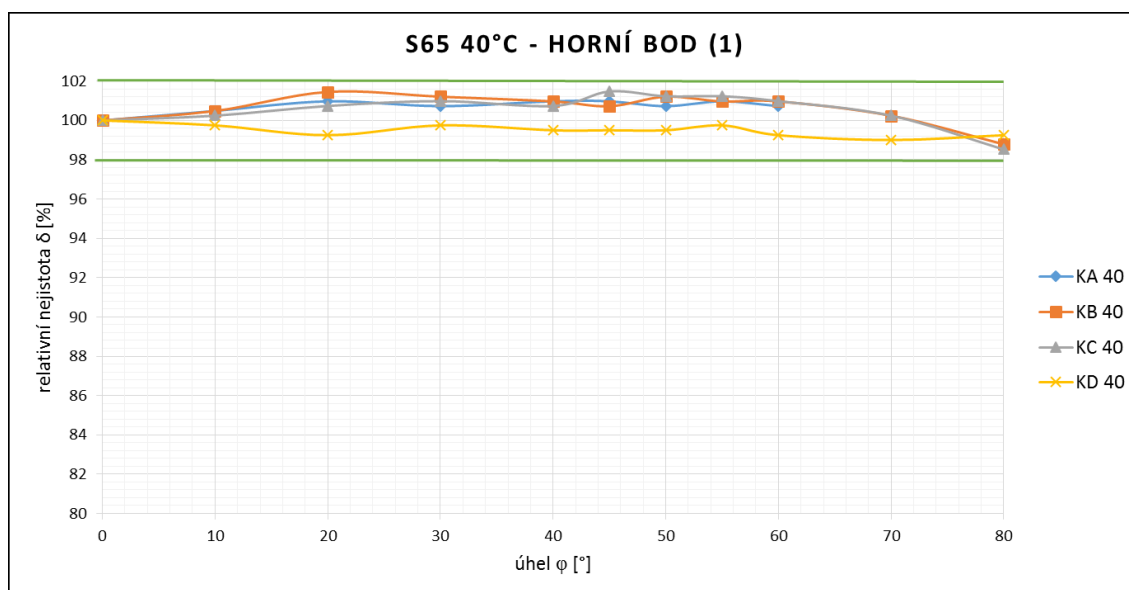
obr. 6.2.-26 – i7 EDU, 60 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 2\%$ 

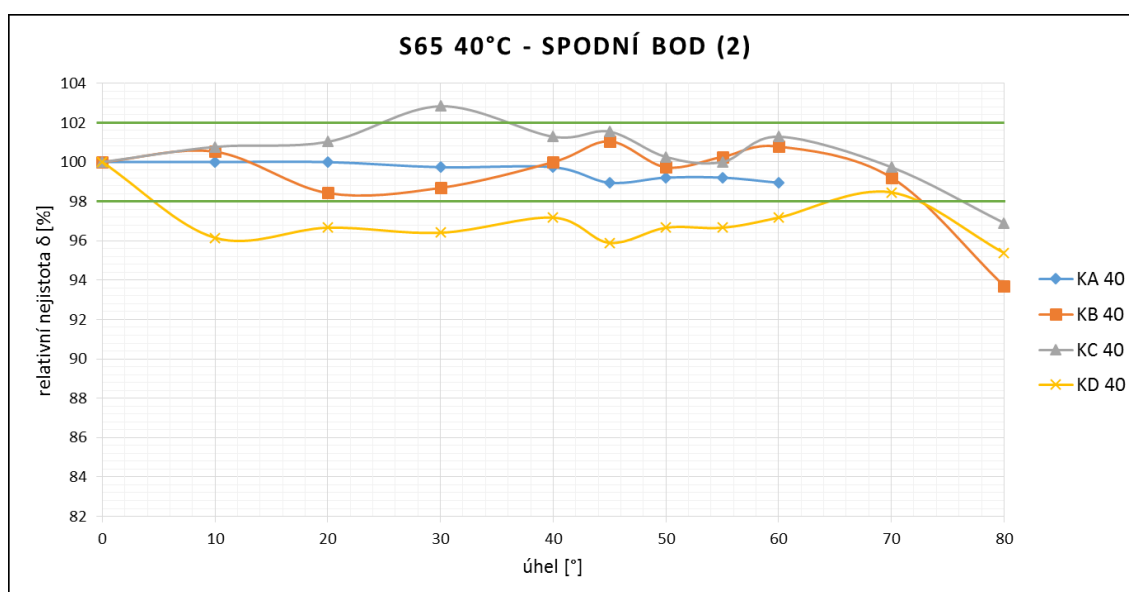
obr. 6.2.-27 – i7 EDU, 80 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 2\%$

6.2.4. Flir S65

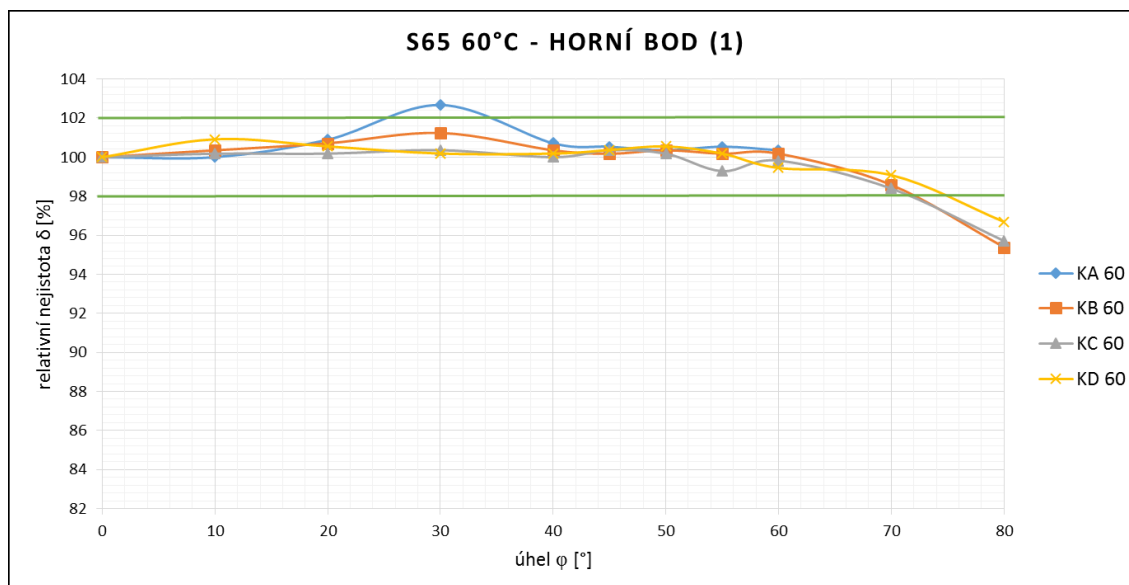


obr. 6.2.-28 – S65, 40 °C, bod 1

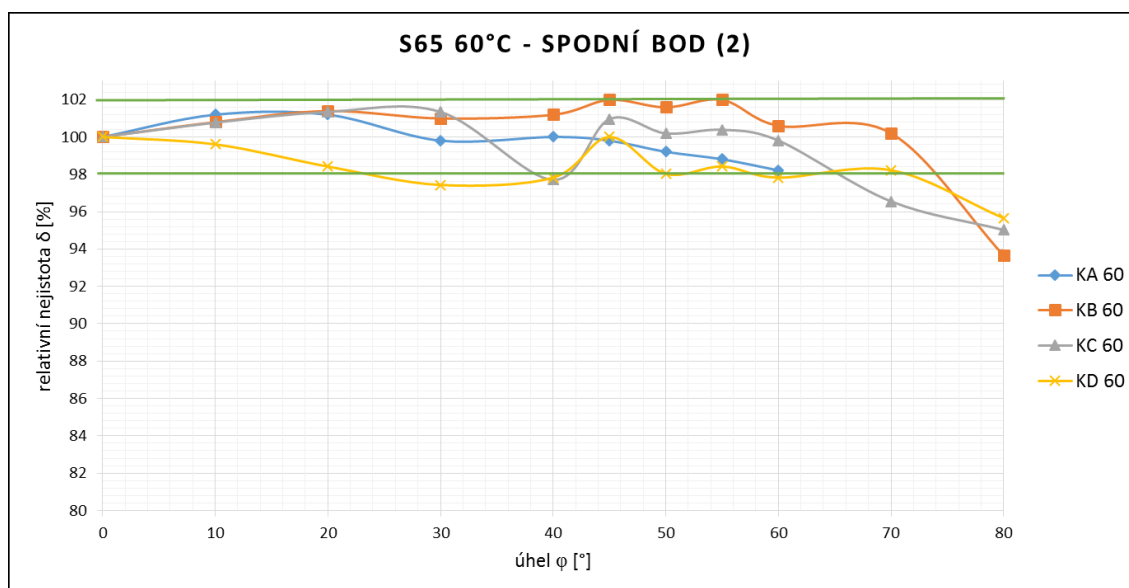
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-29 – S65, 40 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$

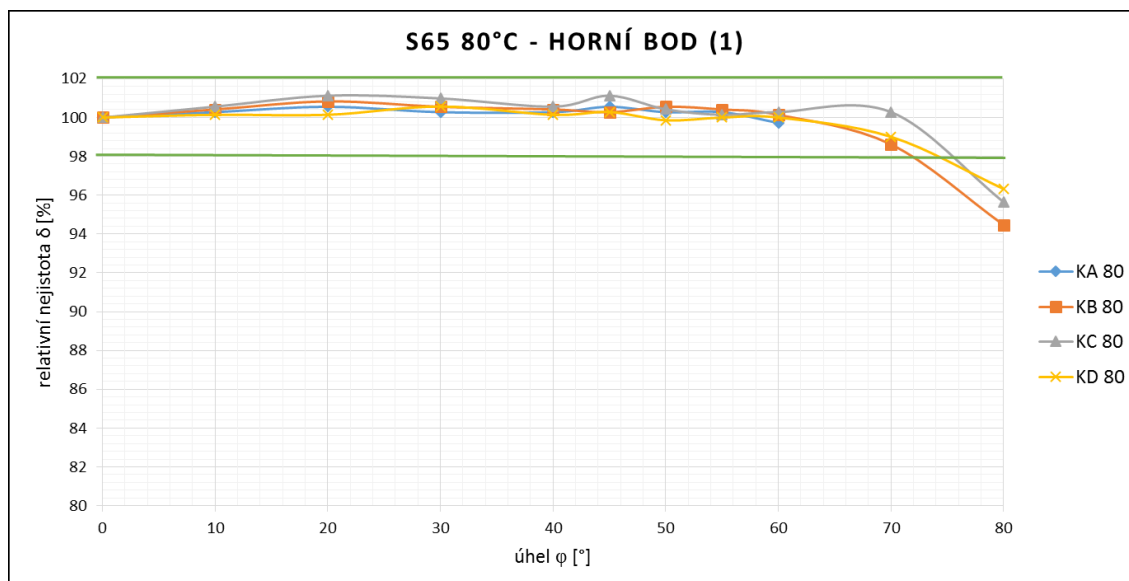


obr. 6.2.-30 – S65, 60 °C, bod 1

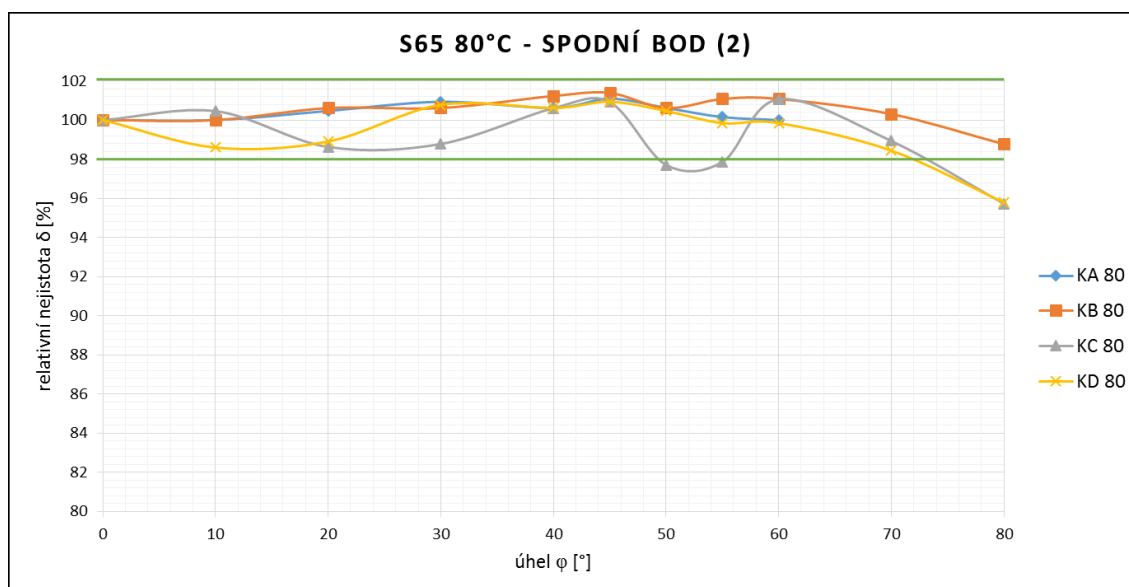
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-31 – S65, 60 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$

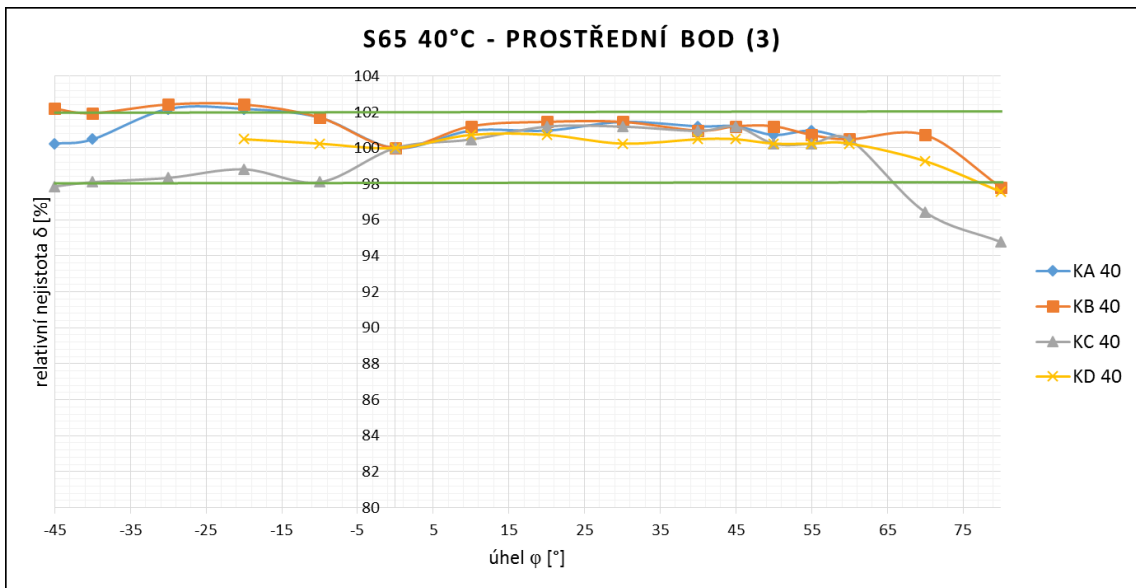


obr. 6.2.-32 – S65, 80 °C, bod 1

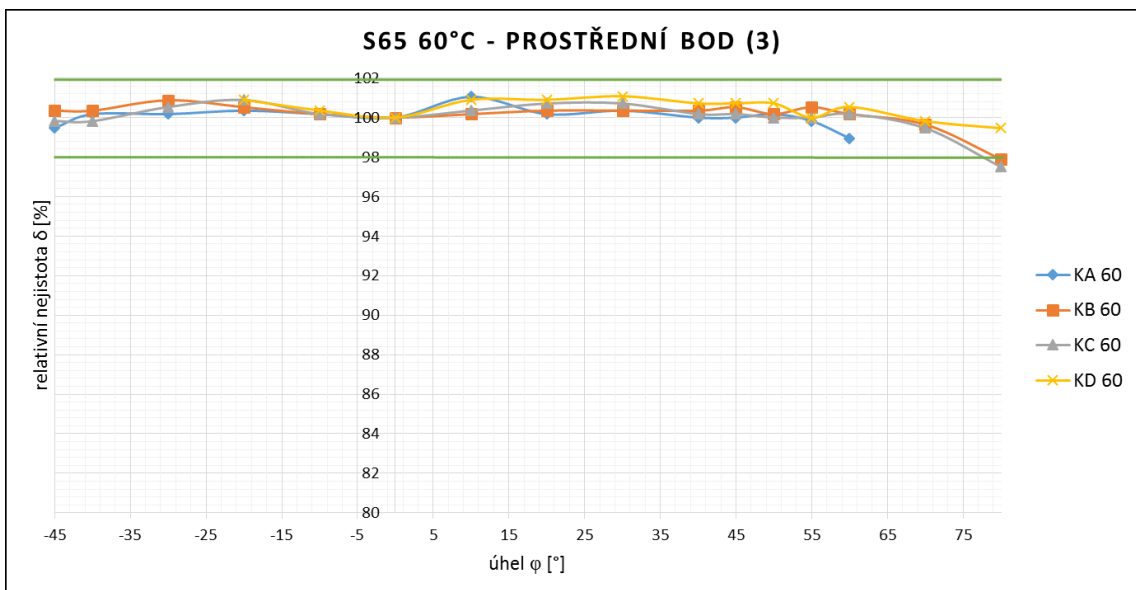
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-33 – S65, 80 °C, bod 2

Přesnost: $\pm 2\%$

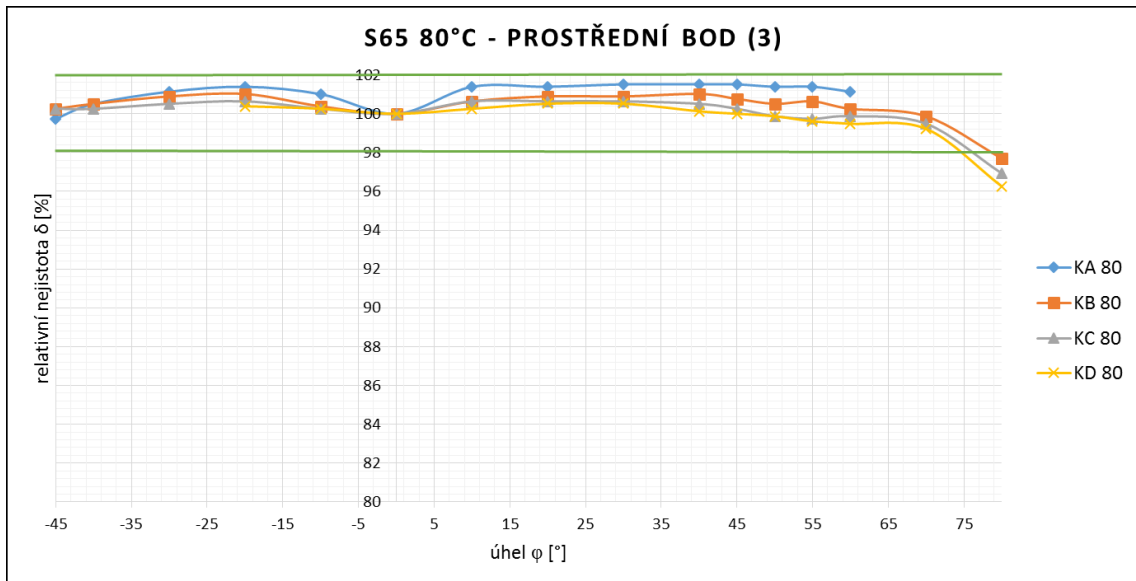
Bod 3:

obr. 6.2.-34 – S65, 40 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-35 – S65, 60 °C, bod 3

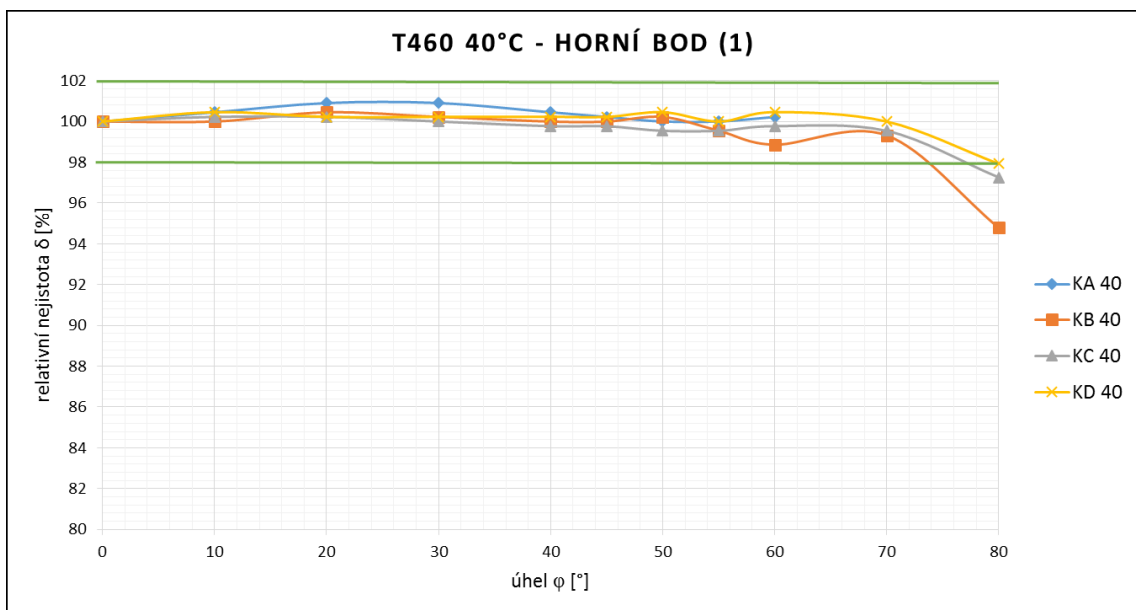
Přesnost: $\pm 2\%$



obr. 6.2.-36 – S65, 80 °C, bod 3

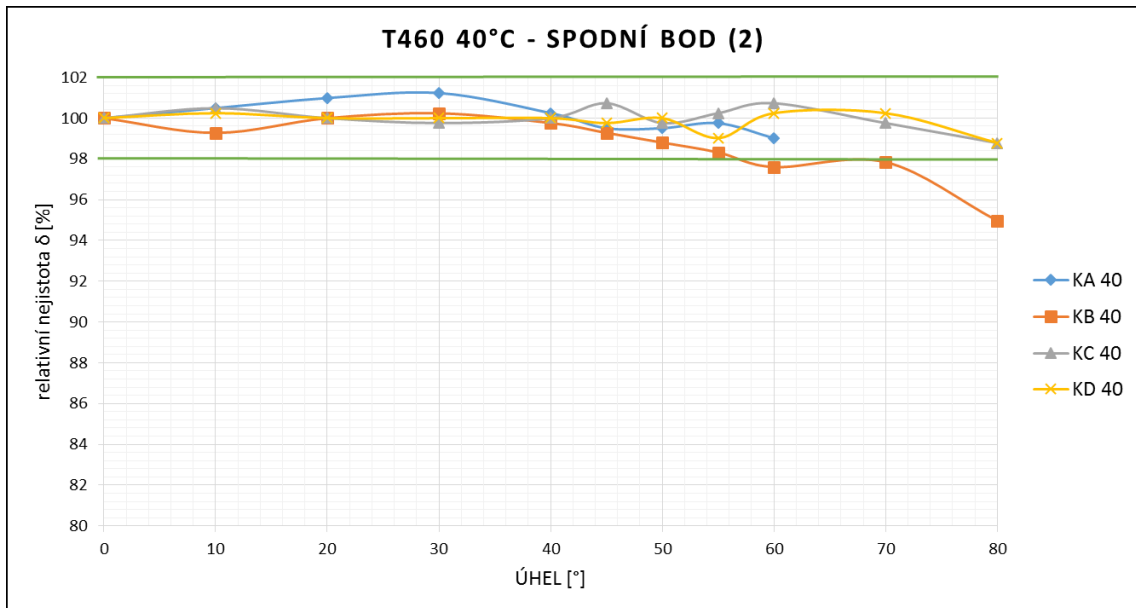
Přesnost: $\pm 2\%$

6.2.5. Flir T460

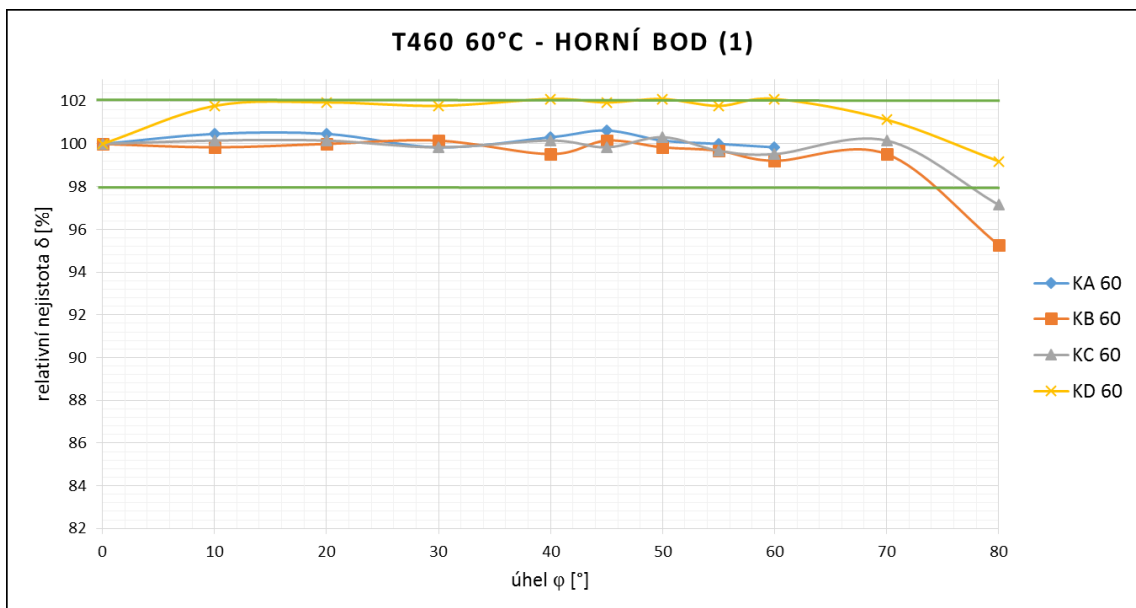


obr. 6.2.-37 – T460, 40 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

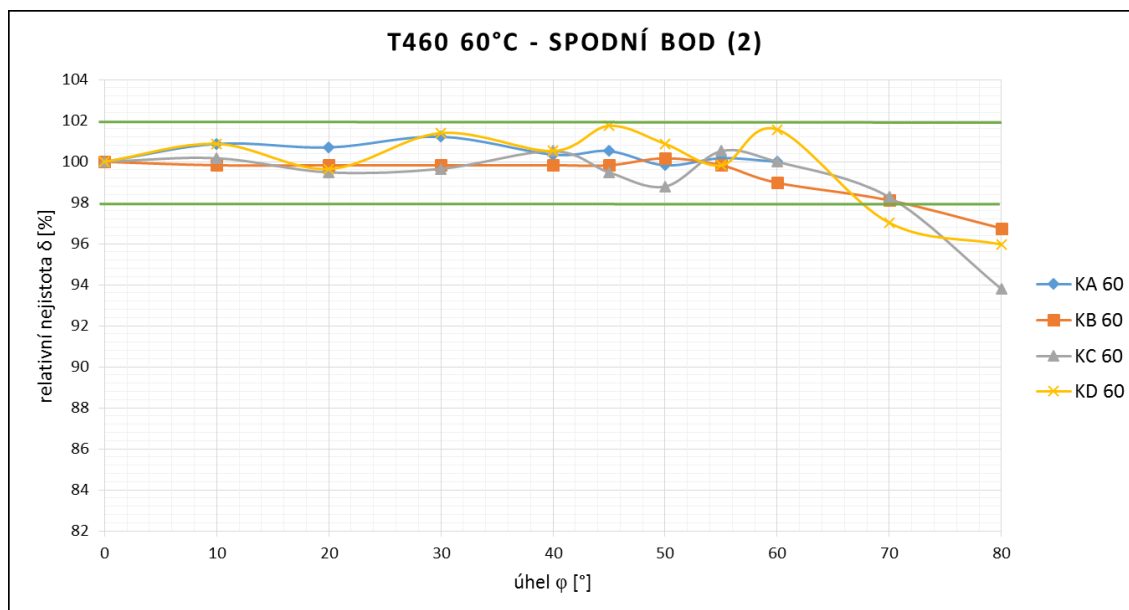


obr. 6.2.-38 – T460, 40 °C, bod 2

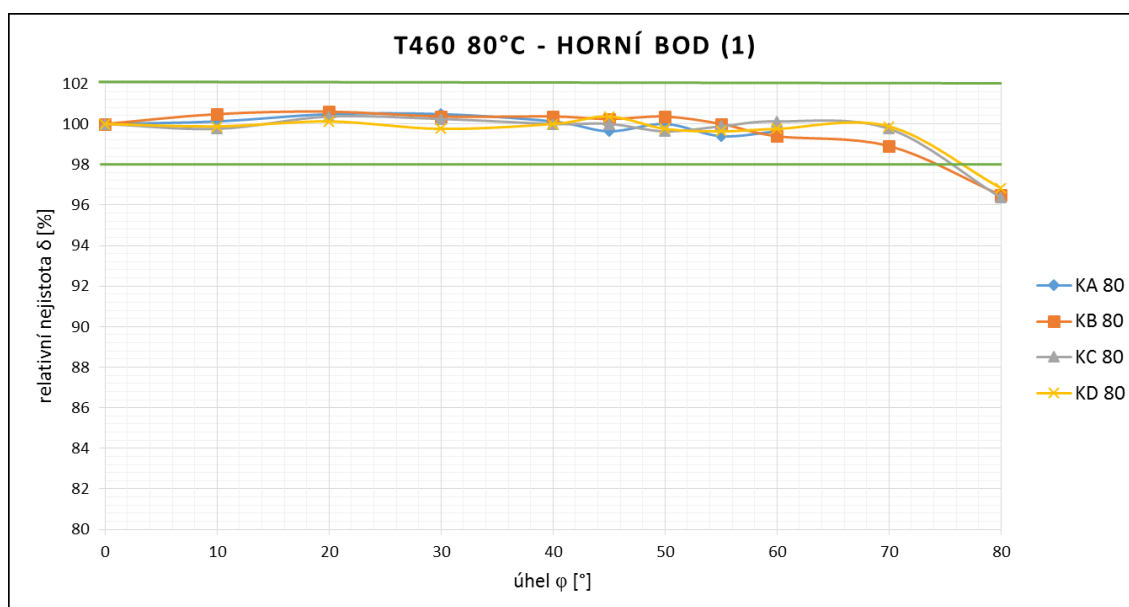
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-39 – T460, 60 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

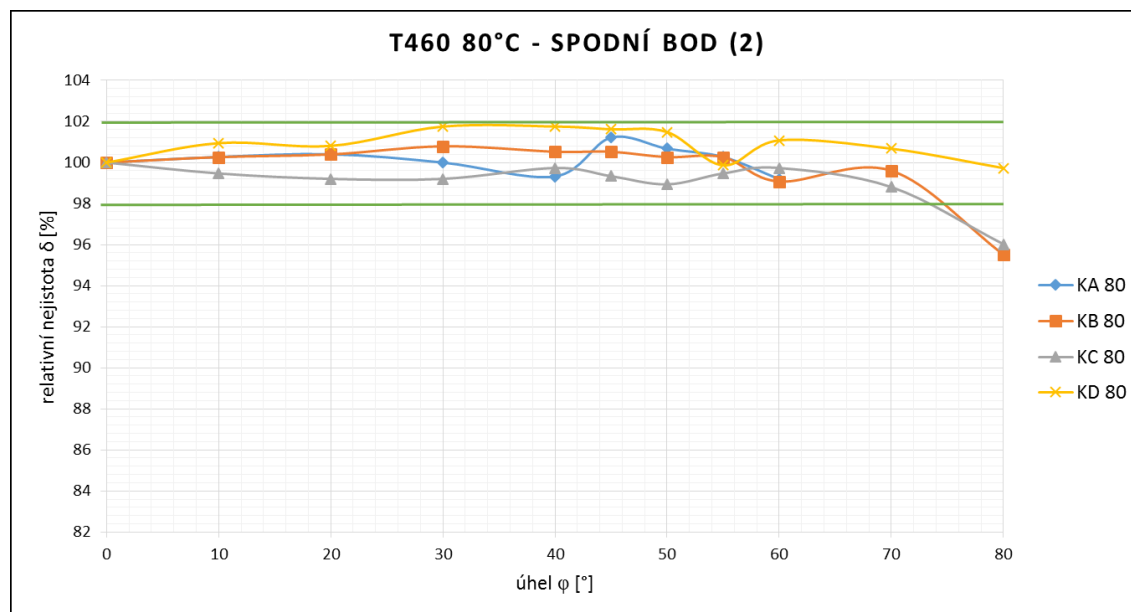


obr. 6.2.-40 – T460, 60 °C, bod 2

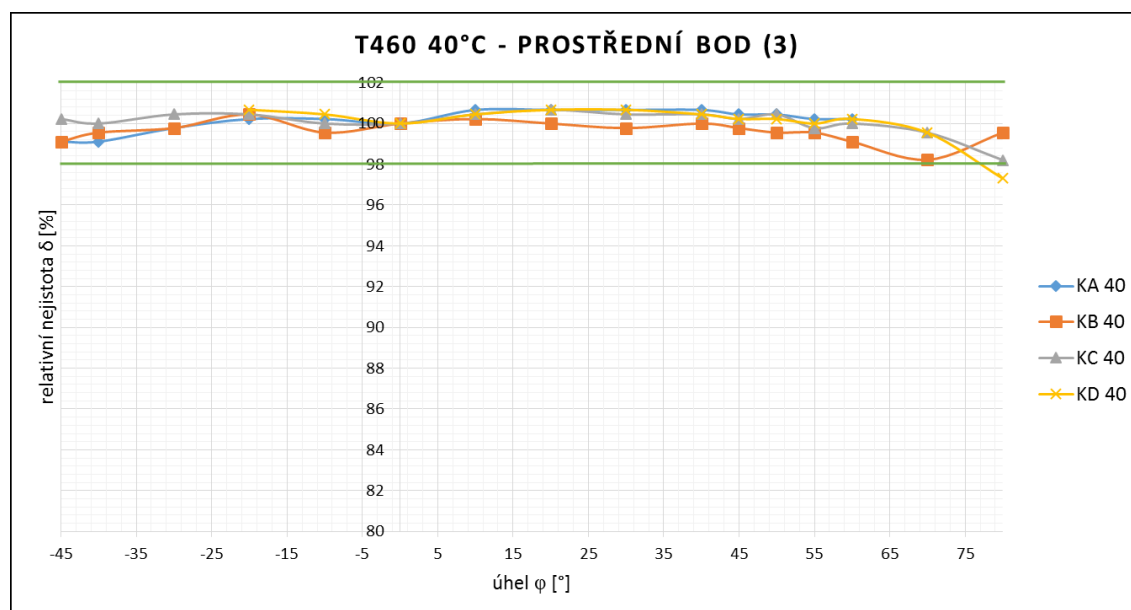
Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-41 – T460, 80 °C, bod 1

Přesnost: $\pm 2\%$

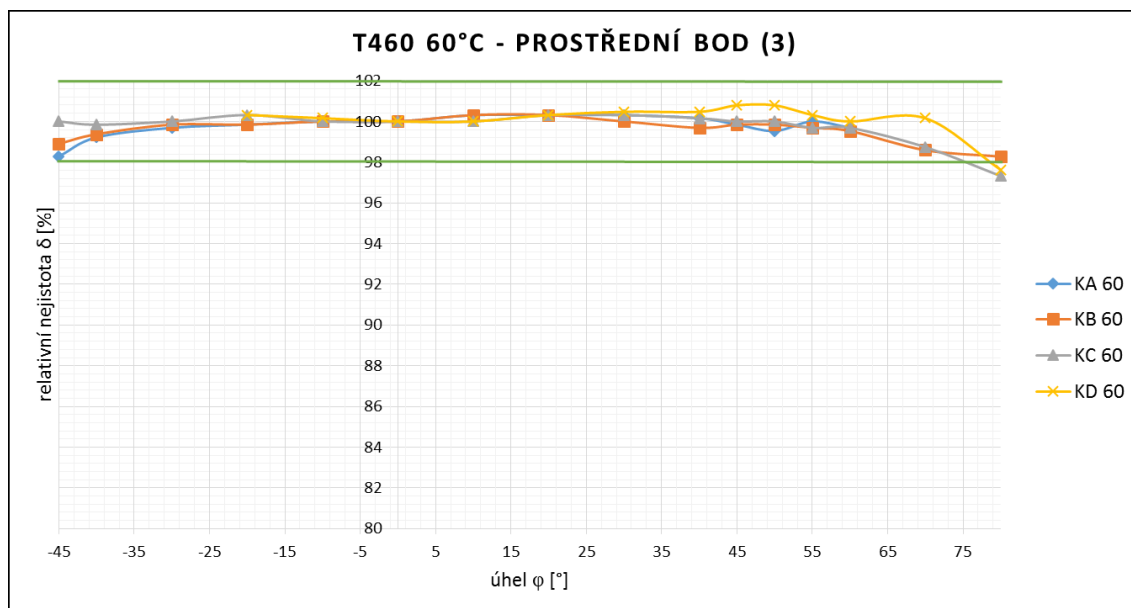


obr. 6.2.-42 – T460, 80 °C, bod 2

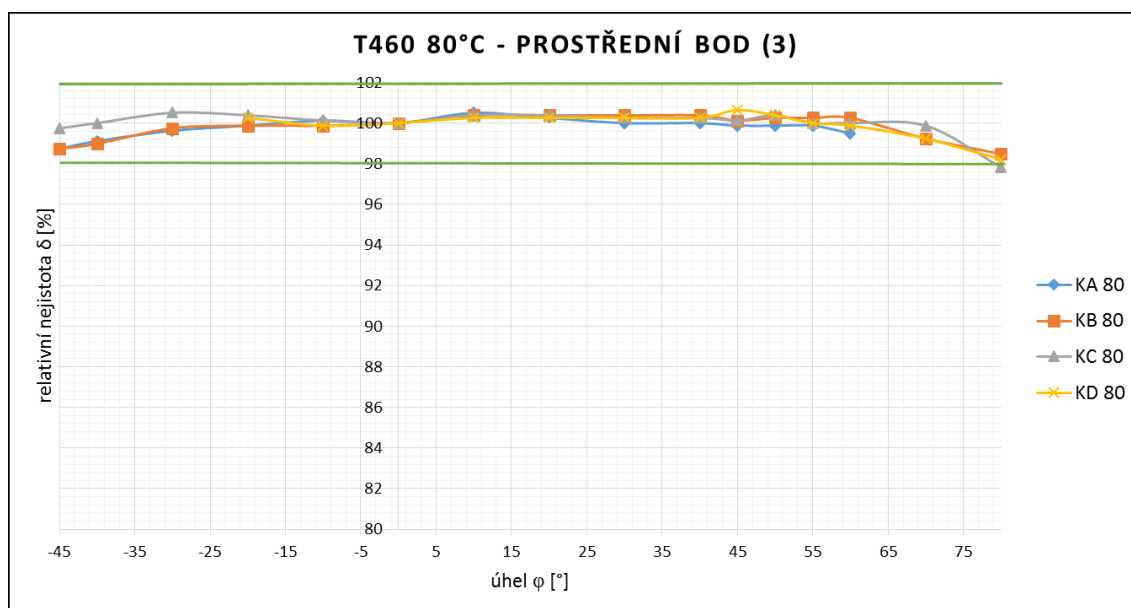
Přesnost: $\pm 2\%$ **Bod 3:**

obr. 6.2.-43 – T460, 40 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 2\%$



obr. 6.2.-44 – T460, 60 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 2\%$ 

obr. 6.2.-45 – T460, 80 °C, bod 3

Přesnost: $\pm 2\%$

7. VYHODNOCENÍ A DISKUZE

Vyhodnocení měření je velmi rozsáhlé. Pro každý měřený bod v libovolném úhlu mám ale naměřenou pouze jednu hodnotu. Měření je zatíženo vysokou nejistotou typu A, tzv. chybou náhodnou. Měření by bylo vhodné opakovat alespoň dvakrát či vícekrát pro přesnější výsledky. Toto ale rozsah bakalářské práce neumožňuje. Chyby měření, které vyhodnotím jako náhodné, zanedbávám. Kritický úhel pohledu φ je tam, kde křivka jako první překročí danou relativní nejistotu přístroje (přesnost).

7.1. Vyhodnocení deskového otopného tělesa

Výsledky deskového otopného tělesa vychází podle očekávání. Kritické hodnoty úhlu pohledu jsou uvedeny v následujících tabulkách. Úhly pohledu větší, než které jsou uvedeny v tabulkách při daných podmínkách, překročily povolenou toleranci daného přístroje.

Deskové otopné těleso - 40 °C										
Přístroj	Testo		Minolta		i7 EDU		S65		T460	
	Bod	1	2	1	2	1	2	1	2	1
	Kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]									
KA ($R_A = 0,5$ m)	51	40	66	45	57	50	60	54	58	55
KB ($R_B = 1$ m)	52	45	66	48	52	38	55	40	48	50
KC ($R_C = 2$ m)	5	40	72	68	48	46	52	20	50	40
KD ($R_D = 3$ m)	20	55	70	64	62	5	60	60	54	40

tab. 7.1.-1 – Hodnoty kritických úhlů pohledu pro deskové těleso otopné těleso – 40 °C

Deskové otopné těleso - 60 °C										
Přístroj	Testo		Minolta		i7 EDU		S65		T460	
	Bod	1	2	1	2	1	2	1	2	1
	Kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]									
KA ($R_A = 0,5$ m)	50	15	58	44	58	20	60	54	60	45
KB ($R_B = 1$ m)	43	5	56	48	55	0	55	40	58	62
KC ($R_C = 2$ m)	48	12	56	44	58	25	54	50	50	45
KD ($R_D = 3$ m)	45	5	58	38	58	0	60	60	58	42

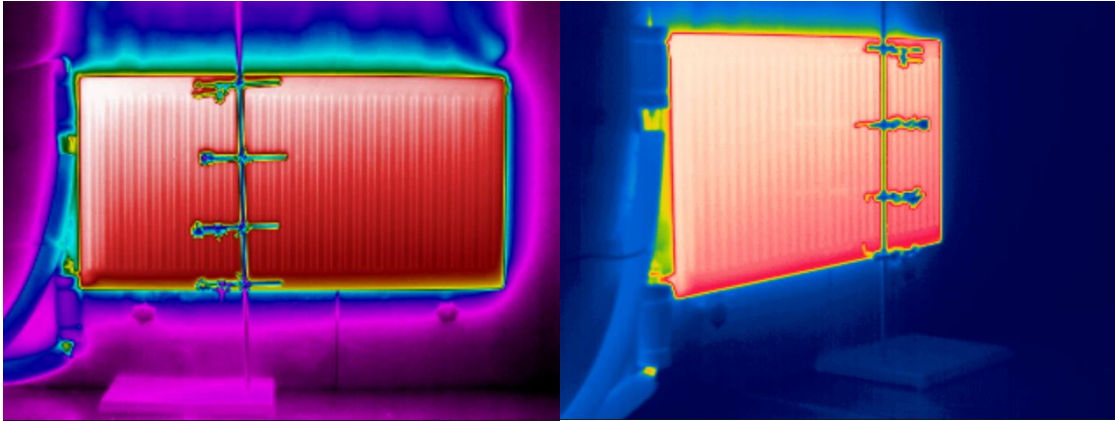
tab. 7.1.-2 – Hodnoty kritických úhlů pohledu pro deskové těleso otopné těleso – 60 °C

Deskové otopné těleso - 80 °C											
Přístroj	Testo		Minolta		i7 EDU		S65		T460		
	Bod	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
	Kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]										
KA ($R_A = 0,5$ m)	30	0	60	38	58	10	50	30	58	50	
KB ($R_B = 1$ m)	5	0	58	35	50	0	58	45	60	50	
KC ($R_C = 2$ m)	5	0	55	48	55	5	53	40	60	45	
KD ($R_D = 3$ m)	5	0	54	10	58	50	55	49	60	48	

tab. 7.1.-3 – Hodnoty kritických úhlů pohledu pro deskové těleso otopné těleso – 60 °C

Červeně zvýrazněné hodnoty v tabulkách označují kritické hodnoty úhlu pohledu, které jsou nepřipustné. To znamená, že při daných podmínkách nedoporučuji s daným přístrojem měřit. Výsledky by pravděpodobně sahaly mimo relativní nejistotu přístroje. Ve většině případů se toto týká měřeného bodu č. 2 a příručních přístrojů. To je zapříčiněno „dvojitou“ odchylkou. Pro vysvětlení máme referenční teplotu, která je měřená kolmo na normálu povrchu, ve stejné výšce jako je bod 2. Při měření bodu pod úhlem naklonění ψ vzniká jedna odchylka a při měření v jiném úhlu pohledu φ vzniká další odchylka. Takže měření bodu 2 bylo vždy zatíženo odchylkou od naklonění přístroje ψ , a k tomu se dále přičítala odchylka od úhlu pohledu φ . Bezkontaktního teploměru značky Minolta se toto většinou netýká, díky své široké toleranci přesnosti ± 2 °C. Ovšem je nutné mít na paměti, např. když měříte objekt o teplotě 40 °C, že Minolta vám může ukázat teplotu 38 °C nebo 42 °C a podle výrobce je vše pořádku. Na druhou stranu, druhý bezkontaktní teploměr značky Testo má při měření teploty vyšší než 75 °C toleranci přesnosti $\pm 0,75\%$ z naměřené hodnoty, což je velmi úzké pásmo jak je vidět na obr. 6.1.-5. Díky tomu Testo právě nejčastěji neuspělo při měření bodu 2. Nejlépe na tom jsou termokamery značky Flir S65 a T460. Průběhy křivek jsou relativně stálější.

Průběžně během měření se kamery automaticky kalibrovaly a někdy to mělo na měření špatný dopad. Např. na obr. 6.1.-28 je vidět, že křivka KB je výrazně jiná v kladných a záporných hodnotách, to je právě zapříčiněno kalibrací termokamery. Po kalibraci kamera náhle měřila teploty vyšší než doposud a tím pak vznikla odchylka v grafu.



obr. 7.1.-1 – Snímek termokamery Flir T460 deskového otopného tělesa ve $\varphi=0^\circ$ (vlevo)

obr. 7.1.-2 – Snímek termokamery Flir S65 deskového otopného tělesa ve $\varphi=55^\circ$ (vpravo)

7.2. Vyhodnocení článkového otopného tělesa

Výsledky článkového otopného tělesa jsou velmi zajímavé a řekl bych, že nepříliš podle očekávání. Nejdříve jsem naměřil a zpracoval body 1 a 2, ale protože se mi výsledky nezdály správně naměřeny, tak jsem jako ověření naměřil ještě bod 3. Bod 3 správnost výsledků potvrdil.

Ve výsledcích bodu 3 viz obr. 6.2.-17, u bezdotykových teploměrů je vidět pravidelná odchylka v úhlu $\varphi = -10^\circ$. Tato odchylka je ovlivněna snímáním nejen měřeného tělesa, ale i pozadí, tedy zdi. Tato odchylka ovlivňuje i úhel $\varphi = 0^\circ$, a na půlkružnici KD i $\varphi = 55^\circ$ viz obr. 7.2.-1 a 7.2.-2. Jak již bylo uvedeno v bodě 4.2.3., maximální teploty jsou dosaženy v úhlu $\varphi = 18^\circ$, protože to je normála k měřené ploše.

Článkové otopné těleso - 40 °C															
Přístroj	Testo			Minolta			i7 EDU			S65			T460		
Bod	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]															
KA ($R_A = 0,5$ m)	60	0	75	80	72	80	80	0	80	80	70	75	80	65	78
KB ($R_B = 1$ m)	70	35	75	80	77	80	80	70	76	80	72	78	74	58	80
KC ($R_C = 2$ m)	75	64	8	80	73	8	80	0	79	80	76	65	78	80	75
KD ($R_D = 3$ m)	75	70	8	80	78	6	80	72	78	80	0	76	80	80	78

tab. 7.2.-1 – Hodnoty kritických úhlů pohledu pro článkové těleso otopné těleso – 40 °C

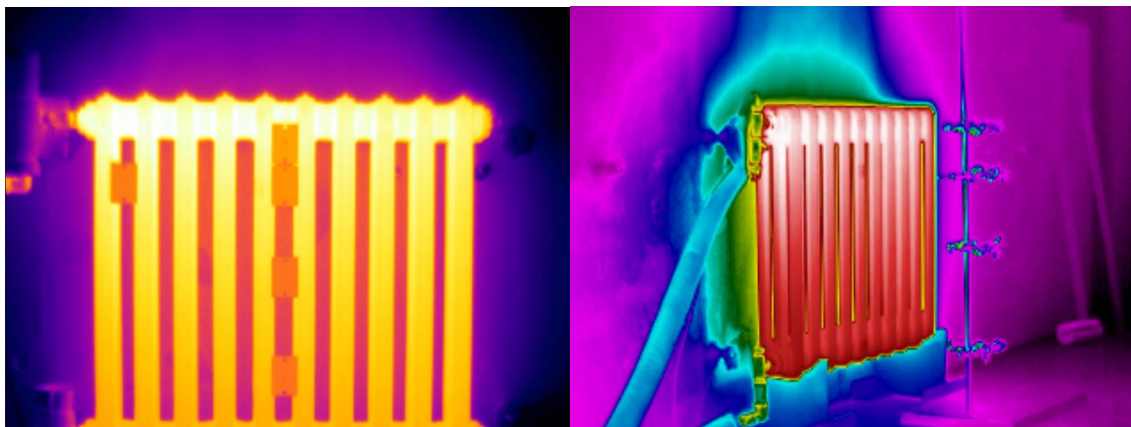
Článekové otopné těleso - 60 °C																
Přístroj	Testo			Minolta			i7 EDU			S65			T460			
	Bod	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]																
KA ($R_A = 0,5$ m)	50	18	80	80	72	80	68	0	74	72	60	65	78	75	80	
KB ($R_B = 1$ m)	70	60	75	75	67	80	68	0	76	72	74	80	74	70	80	
KC ($R_C = 2$ m)	72	64	3	75	73	5	72	0	76	72	65	73	78	71	75	
KD ($R_D = 3$ m)	74	0	3	75	67	5	72	30	12	75	70	80	80	68	78	

tab. 7.2.-2 – Hodnoty kritických úhlů pohledu pro článekové těleso otopné těleso – 60 °C

Článekové otopné těleso - 80 °C																
Přístroj	Testo			Minolta			i7 EDU			S65			T460			
	Bod	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]																
KA ($R_A = 0,5$ m)	58	0	72	66	50	6	76	0	75	70	75	80	75	70	78	
KB ($R_B = 1$ m)	60	0	75	68	0	78	68	17	74	72	80	78	74	75	80	
KC ($R_C = 2$ m)	72	60	3	75	70	3	72	63	78	75	73	75	76	73	79	
KD ($R_D = 3$ m)	5	48	3	75	70	5	76	73	10	74	72	75	76	80	80	

tab. 7.2.-3 – Hodnoty kritických úhlů pohledu pro článekové těleso otopné těleso – 60 °C

Kritické hodnoty úhlu pohledu jsou při srovnání s deskovým otopným tělesem výrazně větší. Musím konstatovat, že práce s příručními přístroji, které jsem měl bez jakéhokoliv podstavce, byla velmi náročná při měření tohoto tělesa. Teplota kolem měřeného bodu byla velmi rozdílná (až v řádech celých °C) a manuální zaměření snímaného bodu bylo mnohokrát obtížné, zvláště z větší vzdálenosti. Následky této příčiny mohou být vidět např. na obrázku 6.2.-22, kde se křivky zcela vyjímají trendu.

obr. 7.2.-1 – Snímek termokamery Flir S65 článekového otopného tělesa ve $\varphi=0^\circ$ (vlevo)obr. 7.2.-2 – Snímek termokamery Flir T460 článekového otopného tělesa ve $\varphi=55^\circ$

(vpravo)

8. ZÁVĚR

Na základě vyhodnocení a diskuze můžeme určit tzv. kritický úhel pohledu v závislosti na teplotě měřeného povrchu, což bylo cílem této práce. Dále můžeme posoudit jaká vzdálenost přístroje od snímaného povrchu je vhodná pro jednotlivé přístroje. Také po této zkušenosti s měřením a bezkontaktními snímači teploty jsem schopen upozornit na problémy, se kterými jsem se setkal během experimentu.

První důležitý poznatek je, že není vhodné kombinovat úhel pohledu ve vertikálním směru s úhlem pohledu v horizontálním směru. Ve většině případů by takové měření bylo zatíženo relativní chybou, která by byla větší než celková relativní chyba přístroje. Proto výsledkům snímání bodu 2, kdy docházelo k vertikálnímu naklopení, nedávám takovou váhu jako výsledkům bodu 1. Mezi výsledky deskového a článkového otopného tělesa vznikly znatelné rozdíly, takže shrnutí jsem rozdělil do dvou tabulek.

Deskové otopné těleso (hladký povrch)						
	Přístroj:	Testo	Minolta	i7 EDU	S65	T460
Teplota [°C]	Výsledná kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]					
40 °C		51	66	48	52	48
60 °C		43	56	55	54	50
80 °C		30	54	50	50	58

tab. 8.-1 – Kritické hodnoty úhlu pohledu pro deskové otopné těleso

Článkové otopné těleso (hrubý povrch)						
	Přístroj:	Testo	Minolta	i7 EDU	S65	T460
Teplota [°C]	Výsledná kritická hodnota úhlu pohledu φ [°]					
40 °C		60	80	76	65	74
60 °C		50	75	68	65	74
80 °C		58	66	68	70	74

tab. 8.-2 – Kritické hodnoty úhly pohledu pro článkové otopné těleso

Z těchto tabulek lze určit závislost kritického úhlu pohledu na teplotě měřeného objektu v měřeném rozsahu od 40 °C do 80 °C. Shoda výsledků pro tato měření je poměrně dobrá. Pravděpodobně jiný případ by nastal, kdyby měřené teploty byly blízké teplotě okolí např. 20 °C nebo naopak výrazně překročily hranici 100 °C.

Další důležitý poznatek je, že pro deskové otopné těleso vyšly hodnoty kritických úhlů řádově o 10° až 15° menší než pro článkové otopné těleso. Průměr výsledných kritických hodnot úhlu pohledu pro článkové otopné těleso je $\varphi = 68^\circ$ a pro deskové

otopné těleso $\varphi = 51^\circ$. To je nejspíš důsledek nerovného povrchu článkového otopného tělesa. Když se vyvarujeme snímání pozadí otopného tělesa mezi jednotlivými články, tak měření můžeme provádět i v téměř kolmých úhlech pohledu. Navíc těleso je odlito, takže povrch má hrubší strukturu a s hrubším povrchem stoupá emisivita. Tady si ovšem můžeme položit otázku, zda při velkých úhlech pohledu měříme bod, který opravdu chceme měřit? U příručních přístrojů, kdy je teplota odečítána přímo z displeje, si odpovědi nejsem zcela jistý, ale u termokamer Flir S65 a T460, kdy je měřený bod daný přesně na jednotku pixelu, už si jistý jsem. A hodnoty kritických úhlů pohledu příručních přístrojů a termokamer S65 a T460 jsou podobně vysoké.

Nyní zhodnocení jednotlivých přístrojů:

Testo QuickTemp 860-T2, zástupce bezkontaktních teploměrů, má ve výsledku nejmenší kritické úhly pohledu. Je to dané tím, že má nejužší toleranci přesnosti ($\pm 0,75^\circ\text{C}$ od -5 do 75°C , $\pm 0,75\%$ z naměřené hodnoty od 75 do 900°C). Při práci s tímto přístrojem bych doporučoval být co nejvíce kolmo k normále měřeného povrchu a v dostatečné vzdálenosti, aby přístroj snímal jen plochu, kterou opravdu snímat chceme.

Minolta Land Cyclops Mini View, zástupce bezkontaktních teploměrů a zároveň nejstarší přístroj, který se v nynější době již nevyrábí, dominuje takřka nejširším dovoleným pásmem úhlu pohledu. Kritické úhly pohledu jsou vztaženy na relativní nejistotu přístroje, a že relativní nejista tohoto přístroje je opravdu veliká ($\pm 2^\circ\text{C}$ od 0 do 200°C). Tímto přístrojem bych doporučoval měřit teploty vyšší než 100°C . Teprve tam se může vyrovnat přesnosti novějších bezkontaktních snímačů teplotu.

Flir i7 EDU, příruční termokamera, jejíž hodnoty kritických úhlů sahají nad 48° . Tyto výsledky s relativní nejistotou termokamery $\pm 2\%$ z naměřených hodnot jsou celkem přijatelné. Vzdálenost mezi měřeným povrchem a přístrojem může být kratší i delší ($0,5$ až 2 m). V krajních případech zvládá měřit i z delší vzdálenosti, tam ale musíme uvážit podle daných podmínek, zda jsou výsledky dostatečně spolehlivé.

Flir S65, termokamera, jejíž nejmenší hodnota kritického úhlu pohledu je 50° . A termokamera Flir T460 s nejmenší hodnotou kritického úhlu pohledu 48° . Obě kamery se vyznačují relativní chybou přístroje $\pm 2\%$. Tyto termokamery, díky následné práci v programu od výrobce, dokázaly přesně určit teplotu snímaného bodu. Výhodou těchto kamer je, že při snímání teploty povrchu z delších vzdáleností nemusíme brát v úvahu skutečnou velikost snímané plochy, jak tomu je u bezkontaktních teploměrů. Respektive

skutečná velikost snímané plochy je o poznání menší a udává jí velikost pixelu termokamery.

Cíl této práce byl splněn. Zjistili jsme kritické hodnoty úhlu pohledu jednotlivých měřicích přístrojů. Na druhou stranu je nutné si položit otázku, s jakou přesností experiment probíhal? Ideální by samozřejmě bylo experiment několikrát zopakovat a provést komplexní analýzu naměřených dat. Na to, ale s ohledem na časové předpoklady měření nebyl čas. Další možností jak zpřesnit výsledky by byla možnost pevného kotvení měřicího přístroje např. do polohovacího zařízení. V dalším výzkumu by proto bylo vhodné zabývat se zlepšením měřicích podmínek a opakovatelnosti získaných hodnot. To bude součástí dalšího měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [L1] Vavříčka, R.: Bezkontaktní způsoby měření teploty. Praha: STP, 2014. 65 s. ISBN 978-80-02
- [L2] Fotometrie a radiometrie. Učební text k přednášce UFY, 11 s. Dostupné z WWW. <http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/files/courses/Fotometrie_a_radiometrie.pdf>
- [L3] Firemní literatura firmy Testo. Dostupné z WWW. <<http://www.termokamera.com/testo/5-Zaklady-termografie/42-Prirucka-termografie>>
- [L4] Litwa, M.: Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera [Online]. Sensors Journal, IEEE, 2010, 3s. Dostupné z WWW. <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05482017&tag=1>>
- [L5] Muniz, P.R.; Cani, S.P.N.; Magalhaes, R.D.S.: Influence of Field of View of Thermal Imagers and Angle of View on Temperature Measurements by Infrared Thermovision [Online]. Sensors Journal, IEEE, 2014, 5 s. Dostupné z WWW. <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6645393>>
- [L6] Lukeš, J.: Vliv napojení otopných těles na tepelný výkon. Praha 2009. ČVUT Fakulta strojní, 100 s. [Diplomová práce 32-TŽP-2009].
- [L7] Katalog firmy Viadrus, a.s. Dostupné z WWW. <<http://www.viadrus.cz/>>
- [L8] Katalog firmy KORADO, a.s. Dostupné z WWW. <<http://www.korado.cz/>>
- [L9] Katalog firmy Flir Systems, s.r.o. Dostupné z WWW. <<http://flir.com/thg>>
- [L10] Katalog firmy Testo. Dostupné z WWW. <http://www.mastertools.com.br/download_catalogo/Testo_860-T1.pdf>
- [L11] Katalog firmy Minolta/Land.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ A TABULEK

obr. 2.1.	Spektrální křivky vyzařování pro absolutně černé těleso o různé teplotě [L1]	12
obr. 2.4.	Lambertův kosinový zákon [2]	15
obr. 3.1.-1	Laboratorní set	17
obr. 3.1.-2	Závislost naměřené chyby na zorném úhlu pro kameru ThermaCAM E25 a vzdálenost $l = 0,55$ m	18
obr. 3.1.-3	Závislost naměřené chyby na zorném úhlu pro kameru Ti20 a vzdálenost $l = 0,55$ m	18
obr. 3.1.-4	Závislost naměřené chyby na zorném úhlu pro kameru TH7800 a vzdálenost $l = 0,55$ m	18
obr. 3.2.	Výsledky měření	20
obr. 4.2.-1	Snímek z termokamery Flir T460 na půlkružnici <i>KD</i>	24
obr. 4.2.-2	Schéma měřicího místa	24
obr. 4.2.-3	Schéma deskového otopného tělesa a měřených bodů	25
obr. 4.2.-4	Schéma článkového otopného tělesa a měřených bodů	25
obr. 4.2.-5	Skica článku v půdorysu	26
obr. 4.2.-6	Snímek článku v půdorysu	26
obr. 4.3.	Detailní schéma měření	26
obr. 4.4.-1	Testo QuickTemp 860-T2 [L10]	27
obr. 4.4.-2	Minolta Land Cyclops Mini View [L11]	28
obr. 4.4.-3	Znázornění zaměřené velikosti snímané plochy detekované bezdotykovým teploměrem [L1]	28
obr. 4.4.-4	Velikost měřicí plochy v závislosti na měřené vzdálenosti použitých bezdotykových teploměrů (rozměry jsou v mm) [L1]	29
obr. 4.4.-5	Termovizní kamera Flir i7 EDU [L9]	29
obr. 4.4.-6	Termovizní kamera Flir S65 [L9]	30
obr. 4.4.-7	Termovizní kamera Flir T460 [L9]	30
obr. 4.5.	Mobilní zdroj tepla	32
obr. 5.1.	Zobrazení měření bodu 2	34
obr. 5.3.	Vyhodnocování snímku v programu	36
obr. 6.1.-1	Testo, 40 °C, bod 1	37
obr. 6.1.-2	Testo, 40 °C, bod 2	38

obr. 6.1.-3	Testo, 60 °C, bod 1	38
obr. 6.1.-4	Testo, 60 °C, bod 2	39
obr. 6.1.-5	Testo, 80 °C, bod 1	39
obr. 6.1.-6	Testo, 80 °C, bod 2	40
obr. 6.1.-7	Minolta, 40 °C, bod 1	40
obr. 6.1.-8	Minolta 40 °C, bod 2	41
obr. 6.1.-9	Minolta 60 °C, bod 1	41
obr. 6.1.-10	Minolta 60 °C, bod 2	42
obr. 6.1.-11	Minolta 80 °C, bod 1	42
obr. 6.1.-12	Minolta 80 °C, bod 2	43
obr. 6.1.-13	i7 EDU, 40 °C, bod 1	43
obr. 6.1.-14	i7 EDU, 40 °C, bod 2	44
obr. 6.1.-15	i7 EDU, 60 °C, bod 1	44
obr. 6.1.-16	i7 EDU, 60 °C, bod 2	45
obr. 6.1.-17	i7 EDU, 80 °C, bod 1	45
obr. 6.1.-18	i7 EDU, 80 °C, bod 2	46
obr. 6.1.-19	S65, 40 °C, bod 1	46
obr. 6.1.-20	S65, 40 °C, bod 2	47
obr. 6.1.-21	S65, 60 °C, bod 1	47
obr. 6.1.-22	S65, 60 °C, bod 2	48
obr. 6.1.-23	S65, 80 °C, bod 1	48
obr. 6.1.-24	S65, 80 °C, bod 2	49
obr. 6.1.-25	T460, 40 °C, bod 1	49
obr. 6.1.-26	T460, 40 °C, bod 2	50
obr. 6.1.-27	T460, 60 °C, bod 1	50
obr. 6.1.-28	T460, 60 °C, bod 2	51
obr. 6.1.-29	T460, 80 °C, bod 1	51
obr. 6.1.-30	T460, 80 °C, bod 2	52
obr. 6.2.-1	Testo, 40 °C, bod 1	52
obr. 6.2.-2	Testo, 40 °C, bod 2	53
obr. 6.2.-3	Testo, 60 °C, bod 1	53
obr. 6.2.-4	Testo, 60 °C, bod 2	54
obr. 6.2.-5	Testo, 80 °C, bod 1	54
obr. 6.2.-6	Testo, 80 °C, bod 2	55

obr. 6.2.-7	Testo, 40 °C, bod 3	55
obr. 6.2.-8	Testo, 60 °C, bod 3	56
obr. 6.2.-9	Testo, 80 °C, bod 3	56
obr. 6.2.-10	Minolta, 40 °C, bod 1	57
obr. 6.2.-11	Minolta, 40 °C, bod 2	57
obr. 6.2.-12	Minolta, 60 °C, bod 1	58
obr. 6.2.-13	Minolta, 60 °C, bod 2	58
obr. 6.2.-14	Minolta, 80 °C, bod 1	59
obr. 6.2.-15	Minolta, 80 °C, bod 2	59
obr. 6.2.-16	Minolta, 40 °C, bod 3	60
obr. 6.2.-17	Minolta, 60 °C, bod 3	60
obr. 6.2.-18	Minolta, 80 °C, bod 3	61
obr. 6.2.-19	i7 EDU, 40 °C, bod 1	61
obr. 6.2.-20	i7 EDU, 40 °C, bod 2	62
obr. 6.2.-21	i7 EDU, 60 °C, bod 1	62
obr. 6.2.-22	i7 EDU, 60 °C, bod 2	63
obr. 6.2.-23	i7 EDU, 80 °C, bod 1	63
obr. 6.2.-24	i7 EDU, 80 °C, bod 2	64
obr. 6.2.-25	i7 EDU, 40 °C, bod 3	64
obr. 6.2.-26	i7 EDU, 60 °C, bod 3	65
obr. 6.2.-27	i7 EDU, 80 °C, bod 3	65
obr. 6.2.-28	S65, 40 °C, bod 1	66
obr. 6.2.-29	S65, 40 °C, bod 2	66
obr. 6.2.-30	S65, 60 °C, bod 1	67
obr. 6.2.-31	S65, 60 °C, bod 2	67
obr. 6.2.-32	S65, 80 °C, bod 1	68
obr. 6.2.-33	S65, 80 °C, bod 2	68
obr. 6.2.-34	S65, 40 °C, bod 3	69
obr. 6.2.-35	S65, 60 °C, bod 3	69
obr. 6.2.-36	S65, 80 °C, bod 3	70
obr. 6.2.-37	T460, 40 °C, bod 1	70
obr. 6.2.-38	T460, 40 °C, bod 2	71
obr. 6.2.-39	T460, 60 °C, bod 1	71
obr. 6.2.-40	T460, 60 °C, bod 2	72

obr. 6.2.-41	T460, 80 °C, bod 1	72
obr. 6.2.-42	T460, 80 °C, bod 2	73
obr. 6.2.-43	T460, 40 °C, bod 3	73
obr. 6.2.-44	T460, 60 °C, bod 3	74
obr. 6.2.-45	T460, 80 °C, bod 3	74
obr. 7.1.-1	Snímek termokamery Flir T460 deskového otopného tělesa ve $\varphi = 0^\circ$ (vlevo)	77
obr. 7.1.-2	Snímek termokamery Flir S65 deskového otopného tělesa ve $\varphi = 55^\circ$ (vpravo)	77
obr. 7.2.-1	Snímek termokamery Flir S65 článkového otopného tělesa ve $\varphi = 0^\circ$ (vlevo)	78
obr. 7.2.-2	Snímek termokamery Flir T460 článkového otopného tělesa ve $\varphi = 55^\circ$ (vpravo)	78
tab. 3.1.	Kritické úhly jednotlivých typů termokamer při různých vzdáleností ...	19
tab. 3.2.-1	Charakteristika termokamery	19
tab. 3.2.-2	Výsledky párového T-Testu	21
tab. 5.1.	Úhel naklopení přístroje ψ při měření bodu 2	34
tab. 5.2.-1	Tabulka naměřených teplot	35
tab. 5.2.-2	Tabulka přepočtených hodnot	35
tab. 7.1.-1	Hodnoty kritických úhlů pohledu pro deskové těleso otopné těleso – 40 °C	75
tab. 7.1.-2	Hodnoty kritických úhlů pohledu pro deskové těleso otopné těleso – 60 °C	75
tab. 7.1.-3	Hodnoty kritických úhlů pohledu pro deskové těleso otopné těleso – 60 °C	76
tab. 7.2.-1	Hodnoty kritických úhlů pohledu pro článkové těleso otopné těleso – 40 °C	77
tab. 7.2.-2	Hodnoty kritických úhlů pohledu pro článkové těleso otopné těleso – 60 °C	78
tab. 7.2.-3	Hodnoty kritických úhlů pohledu pro článkové těleso otopné těleso – 60 °C	78
tab. 8.-1	Kritické hodnoty úhlu pohledu pro deskové otopné těleso	79
tab. 8.-2	Kritické hodnoty úhlu pohledu pro článkové otopné těleso	79