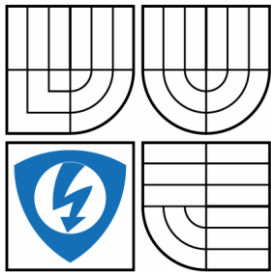


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI THERMAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

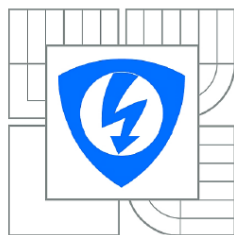
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAKUB KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Jakub Krejčí  
**Ročník:** 3

**ID:** 151650  
**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

### Měření tepelné vodivosti

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je ověření nestacionární metody měření tepelné vodivosti.

1. Zpracujte rešerši týkající se nestacionárních metod měření tepelné vodivosti se zaměřením na metody využívající bodové a liniové zdroje a způsoby jejich technické realizace.
2. Vybrané nestacionární metody experimentálně ověřte a naměřené průběhy teplot porovnejte s teoretickými předpoklady.
3. Navrhněte a realizujte laboratorní přípravku vhodný do laboratorních cvičení, diskutujte volbu parametrů přípravku.
4. Stanovte nejistoty měření u vybrané nestacionární metody, porovnejte různé metody výpočtu tepelné vodivosti.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Krempaský, J.: Meranie termofyzikálných veličín. 1. vyd. Bratislava, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 25.5.2015

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá nestacionárním měřením tepelné vodivosti s využitím liniového a bodového zdroje. Jsou porovnány různé metody měření tepelné vodivosti a navrhnutá vlastní korekce na dobu trvání tepelného pulsu. V praktické části jsou popsány vytvořené přípravky pro laboratorní cvičení včetně dosažených výsledků a porovnání se simulacemi.

## **Klíčová slova**

Tepelná vodivost, nestacionární měření, liniový zdroj tepla, bodový zdroj tepla, korekce tepelné vodivosti na dobu pulsu

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with non-stationary thermal conductivity measurement using line and point heat source. There are compared various methods thermal conductivity measurement and designed own correction for pulse duration. The practical part describes created exemplar for laboratory exercises including achieved results and comparing with simulations.

## **Keywords**

Thermal conductivity, non-stationary measurement, line heat source, point heat source, correction thermal conductivity for pulse length

### **Bibliografická citace:**

KREJČÍ, J. *Měření tepelné vodivosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření tepelné vodivosti jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **22. května 2015**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady a čas strávený konzultacemi při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **22. května 2015**

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVODNÍ SLOVO, MOTIVACE</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>METODY MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI</b> .....	<b>10</b>
2.1	Lineární pulzní zdroj.....	10
2.2	Bodový pulzní zdroj .....	11
<b>3</b>	<b>POPIS MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU</b> .....	<b>13</b>
3.1	Přípravky s lineárním zdrojem.....	13
3.2	Přípravek s bodovým zdrojem.....	14
<b>4</b>	<b>POSTUP MĚŘENÍ</b> .....	<b>16</b>
4.1	Přípravek s liniovým zdrojem.....	16
4.2	Přípravek s bodovým zdrojem.....	17
<b>5</b>	<b>SEZNAM PŘÍSTROJŮ, PŘÍPRAVKŮ, DOKUMENTACE</b> .....	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ S LINIOVÝM ZDROJEM</b> .....	<b>21</b>
6.1	Měření s pálenou cihlou - dříve zhotovený vzorek.....	21
6.2	Měření s vápenopískovou cihlou .....	22
6.3	Měření s pálenou cihlou .....	24
6.4	Měření s pórobetonem Ytong.....	26
6.5	Termistor .....	28
6.6	Měření s vápenopískovou cihlou, teplotní senzor Heraeus .....	34
6.7	Měření s pálenou cihlou na FAST.....	35
<b>7</b>	<b>MĚŘENÍ S BODOVÝM ZDROJEM</b> .....	<b>36</b>
7.1	Měření s termistorem .....	36
7.2	Měření s PT čidlem.....	38
7.3	Měření s termokamerou .....	40
7.4	Vliv přichycení zdroje u kontaktního měření.....	42
<b>8</b>	<b>NÁVRH VLASTNÍ KOREKCE NA DOBU PULSU</b> .....	<b>44</b>
<b>9</b>	<b>ODHAD NEJISTOT MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ METOD MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI</b> .....	<b>46</b>
9.1	Rušení .....	46
9.2	Přesnost měřených veličin .....	46
9.3	Získání naměřené teploty .....	47
9.4	Referenční hodnota tepelné vodivosti .....	47
9.5	Rovnice výpočtu tepelné vodivosti .....	48

9.6 Jiné metody výpočtu tepelné vodivosti .....	49
<b>10 ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
<b>11 LITERATURA.....</b>	<b>51</b>
<b>12 SEZNAM SYMBOLŮ A PŘÍLOH .....</b>	<b>53</b>
12.1 Seznam symbolů .....	53
12.2 Seznam příloh .....	53



# 1 Úvodní slovo, motivace

Tato práce shrnuje postup experimentálního ověření měření tepelné vodivosti pevných látek nestacionární metodou. Tepelná vodivost je jeden z fyzikálních parametrů udávající, jak je daná látka schopna vést teplo. Ve stavebnictví má svoje místo pro popis materiálů z hlediska izolačních vlastností, které jsou důležité kvůli energetické náročnosti budov.

Princip tohoto měření je použit u laboratorní úlohy na FAST VUT<sup>[1]</sup>, kde je použita varianta s lineárním zdrojem. Cílem této práce je zopakovat experiment podobného rozsahu na vlastních vzorcích a co nejvíce vystihnout faktory ovlivňující přesnost měření. Pokud budou výsledky dostatečně přesné a opakovatelné, bude možné tyto vzorky využít při tvorbě nových laboratorních úloh. Navázáním na tyto výsledky s využitím získaných zkušeností může být dalším krokem vytvoření přenosného měřicího přípravku, který by využíval bodový zdroj (pro přenosný přípravek je vhodný díky minimálnímu kontaktu s měřeným vzorkem).

Jelikož se částečně opakuje již dříve provedený experiment, je možné navázat na některé výsledky a vyvarovat se chybám, na které se přišlo dříve. Pro stejný účel může být v budoucnu použita i tato práce.

## 2 Metody měření tepelné vodivosti

Prostup tepla prostředím charakterizuje tepelná vodivost  $\lambda$ , která je definována Fourierovým zákonem <sup>[1],[2],[3]</sup>

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T, \quad (1)$$

kde  $\mathbf{q}$  je vektor hustoty tepelného toku a  $T$  je skalár teplotního pole. Základem měření tepelné vodivosti je parciální diferenciální rovnice difúzních dějů <sup>[1],[2],[3]</sup>

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[\lambda \text{grad}T] + q_0, \quad (2)$$

kde  $q_0$  je výkon, s jakým je teplo generováno v jednotkovém objemu látky,  $t$  je čas,  $c$  je měrná tepelná kapacita a  $\rho$  je hustota látky. Pro izotropní látky platí  $\text{div}[\lambda \text{grad}T] = \lambda \Delta T$ , proto můžeme psát: <sup>[1],[2],[3]</sup>

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c\rho} q_0, \quad k = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (3), (4)$$

kde  $k$  je teplotní vodivost.

Obecnými mechanismy šíření tepla a metodami měření tepelné vodivosti se zabývala starší bakalářská práce <sup>[4]</sup>, nebudu se proto zabývat hlubším popisem této problematiky, ale metody rozdělím do několika skupin a potom se zaměřím na ty, které jsou pro tuto práci podstatné.

Metody pro měření tepelné vodivosti můžeme rozdělit do 2 skupin, a to na metody využívající zdroje ( $q_0 \neq 0$ ), a metody bez zdrojů ( $q_0 = 0$ ). U metod bezdrojových je teplota ovlivňována kontaktem s prostředím představujícím nekonečný zásobník tepla, u metod zdrojových je využito tepelného působení zdroje uvnitř nebo na povrchu vzorku. Toto rozdělení je ale spíše konvenční, protože vliv zdroje může být zahrnut do počátečních podmínek řešení a formálně získáme metodu bezdrojovou.

Z jiného hlediska můžeme metody rozdělit na stacionární a nestacionární. U stacionárních metod je nutné čekat na stacionární (ustálený) stav, kterého může být dosaženo za relativně dlouhou dobu. Jelikož není u nestacionárních metod tento požadavek kladen, jsou rychlejší a právě jimi se budu dále zabývat.

Zajímavým poznatkem také je, že metody s bodovým a liniovým jsou výhodné, pokud nemáme měřené vzorky definovaného tvaru. Účelem přenosného měřicího přístroje by bylo například měřit nejen vlastnosti samostatných vzorků, ale i postavených budov, ze kterých si vzorky definovaných tvarů nevytvoříme.

### 2.1 Lineární pulzní zdroj

Při ohřívání lineárního zdroje umístěného uvnitř vzorku se symetricky zahřívá jeho okolí. Tepelnou vlnu si můžeme představit v podobě zvětšujícího se válce, kde zdroj by tvořil jeho rotační osu, izotermy by měly tvar kružnic. V polonekonečném prostředí se kolem zdroje umístěného na povrchu šíří do okolí v podobě půlválce a izotermami jsou půlkružnice.

Pro polonekonečný vzorek s lineárním pulzním zdrojem tepla je teplotní funkce (při zanedbání odvodu tepla do okolí) dána vztahem: <sup>[1],[2],[3]</sup>

$$T = T_0 + \frac{Q_{lin}}{2\pi\lambda t} \Phi\left(\frac{b}{4\sqrt{kt}}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right), \quad (5)$$

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy, \quad (6)$$

kde  $T_0$  je počáteční (okolní) teplota,  $Q_{lin}$  je teplo vyslané z jednotky délky lineárního zdroje v jistém krátkém časovém intervalu  $\Delta t$ ,  $r$  je vzdálenost mezi zdrojem a čidlem a  $b$  je délka lineárního zdroje. Čím větší jsou charakteristické rozměry vzorku vůči vzdálenosti  $r$ , tím lépe je splněna aproximace polonekonečného vzorku. Pokud je tloušťka vzorku  $s > \sqrt{2}r$ , může být vzorek považován za polonekonečný. Je-li argument funkce  $\Phi(x)$  větší než 1, tedy  $x = \frac{b}{4\sqrt{kt}} > 1$ , pak funkce  $\Phi(x)$  konverguje k jedné a teplotní funkce má jednodušší tvar: <sup>[1],[2],[3]</sup>

$$T' = T_0 + \frac{Q}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right). \quad (7)$$

Podmínka pro argument  $x$  může být zapsána do jednodušší podoby, a to:  $\frac{b}{r} > 2$ .

Zjednodušená funkce má maximum v čase  $t = t_m = \frac{r^2}{4k}$  a pro výslednou tepelnou vodivost můžeme psát  $\lambda = \frac{\rho cr^2}{4t_m}$  pro  $\Delta t \ll t_m$ .

Z důvodu, že nelze veškerou energii dodat pomocí zdroje v nekonečně krátkém okamžiku, je nutné brát v úvahu délku trvání tepelného pulsu  $\Delta t$  a korigovat tak i vztah pro výpočet tepelné vodivosti: <sup>[1],[2]</sup>

$$\lambda = \frac{\rho cr^2}{4\Delta t} \left[ \frac{\Delta t}{t_m} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t}{t_m}\right)^2 + \frac{5}{12} \left(\frac{\Delta t}{t_m}\right)^3 + \dots \right]. \quad (8)$$

Pozn.: Rozvoj je v literatuře uveden v této formě, další členy řady se nepodařilo dohledat

Abychom nemuseli používat korigovaný vztah, muselo by pro přesnost lepší než 1% platit, že  $t_m > 50 \cdot \Delta t$ .

Tuto podmínku však není příliš vhodné splňovat, protože pro použité materiály by při zvolených měřicích parametrech (vzdálenost čidla od zdroje) musel tepelný puls trvat velmi krátkou dobu – toto je nevhodné z hlediska přesnosti měření času a také proto, že předané teplo by bylo malé, tedy hůře detekovatelné a zvyšovaly by se chyby měření.

## 2.2 Bodový pulzní zdroj

Pro vytvoření přenosného měřicího přípravku se však více hodí bodový pulzní zdroj, kde je přenos tepla realizován co nejmenší plochou kvůli jednoduchosti připevnění zdroje na povrch.

U bodového zdroje se teplo šíří do jisté míry podobně jako u liniového zdroje. Šíří se také symetricky, nešíří se však ve tvaru zvětšujícího se válce, ale zvětšující se koule.

Izotermami jsou v tomto případě kulové plochy. V polonekonečném prostředí jsou těmito tvary polokoule a polovina kulové plochy.

Pro šíření tepla polonekonečným vzorkem s bodovým zdrojem platí (při zanedbání odvodu tepla do okolí) následující rovnice: <sup>[2],[3]</sup>

$$T' = T_0 + \frac{Q_{bod}}{4 \cdot \pi^2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{kt^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right). \quad (9)$$

Tato rovnice platí za předpokladu:  $s > 1,1 \cdot r$ .

V tomto případě dochází k dosažení teplotního maxima v čase  $t = t_m = \frac{r^2}{6k}$  a pro tepelnou vodivost platí vztah  $\lambda = \frac{\rho cr^2}{6t_m}$ .

Pro konečné délky tepelného pulsu je také nutné provést obdobnou korekci výsledku jako u lineárního zdroje, konkrétně zde by pro tepelnou vodivost platilo: <sup>[2]</sup>

$$\lambda = \frac{\rho cr^2}{6\Delta t} \left[ \frac{\Delta t}{t_m} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta t}{t_m} \right)^2 + \frac{5}{12} \left( \frac{\Delta t}{t_m} \right)^3 + \dots \right]. \quad (10)$$

Pozn.: Rozvoj je v literatuře uveden v této formě, další členy řady se nepodařilo dohledat

## 3 Popis měřicího přípravku

### 3.1 Přípravky s lineárním zdrojem

Pro první měření byl vybrán lineární tepelný zdroj (odporový drát) pracující v pulzním režimu umístěný na povrchu vzorku. Nestacionární metoda nám přináší výhodu v menší časové náročnosti na celé měření ve srovnání s metodami stacionárními.

K měřenému objektu – stavební cihle o rozměrech 29 x 14 x 6,5 cm – je připevněn odporový drát. U pálené cihly bylo použito připevnění pomocí směsi cihlového prášku a vodního skla, k vápenopískové cihle je odporový drátek uchycen pomocí sádry (snaha použití materiálů s podobnými vlastnostmi). Ve vzdálenosti  $r = 3$  cm kolmo od drátku je dvousložkovým lepidlem přilepen termistor s předem přeměřenou charakteristikou.

Můžeme diskutovat volbu těchto parametrů podle požadavků uvedených v kapitole 2.1:

Pro vzdálenost  $r$  musí platit  $r < \frac{\sqrt{2}}{2}s = \frac{\sqrt{2}}{2}6,5 \text{ cm} \cong 4,6 \text{ cm}$ .

Druhá z podmínek vypadá po dosazení následovně:  $r < \frac{b}{2} = \frac{14 \text{ cm}}{2} = 7 \text{ cm}$ .

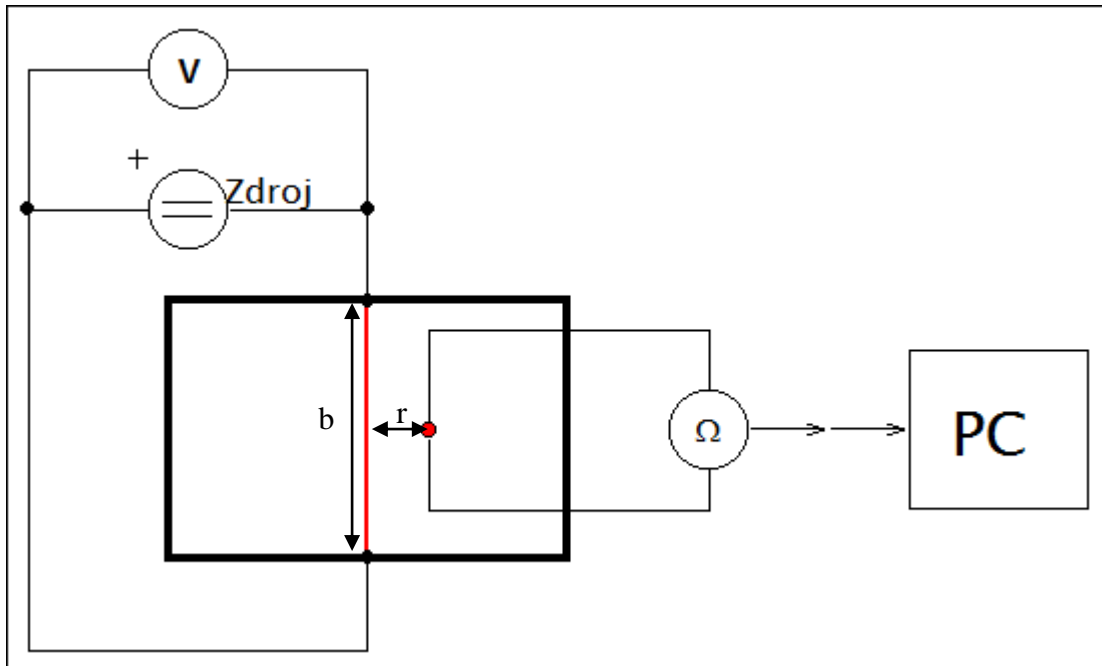
Díky výběru naší vzdálenosti čidla od zdroje vůči rozměrům vzorku je splněn předpoklad polonekonečného vzorku.

Přípravek z pórobetonu byl zmenšen z větší příčkové tvárnice na rozměry obdobné s předchozími dvěma objekty (25 x 15 x 7 cm) a drátek byl přichycen pomocí teplovodivé pasty. (Pozn.: Z důvodu časové nestálosti byla teplovodivá po měřeních pasta nahrazena sádrkou, ale neproběhla další měření s takto připevněným zdrojem.) Termistor zde však není přilepen, je možné s ním manipulovat a měřit v různých vzdálenostech od zdroje. Kromě termistoru je možné měřit i platinovým teplotním senzorem. Podmínky pro vzdálenost  $r$  jsou podobné jako u pálené cihly, dokonce může být mírně větší ( $r < 4,95 \text{ cm}$ ).

Jelikož měříme změny malých teplot, je nutná tepelná izolace od okolí. Týká se to především termistoru, který byl nejprve opatřen hranolem polystyrenu. Avšak ani ten příliš nepomohl zcela zabránit příjmu tepelného záření a tepelným výkyvům způsobeným pohybem vzduchu v okolí. Proto byl polystyren nahrazen minerální vatou, které lépe přilehla k povrchu cihly a také dokázala zakrýt celé nožičky termistoru.

Při některých měřeních bylo použito zakrytí prostoru cihly mezi odporovým drátkem a čidlem pro omezení vyzařování do prostředí. Rozdíl s takto zakrytou cihlou nebo cihlou bez zakrytí byl minimální. Pro omezení vlivu proudění vzduchu byl celý přípravek zakryt krabicí, což v kombinaci s použitím minerální vaty na termistoru výrazně omezilo parazitní vlivy.

**Obrázek č. 1: Schéma měřícího přípravku s lineovým zdrojem**



b...délka lineárního zdroje (šířka cihly)

r...vzdálenost čidla od zdroje

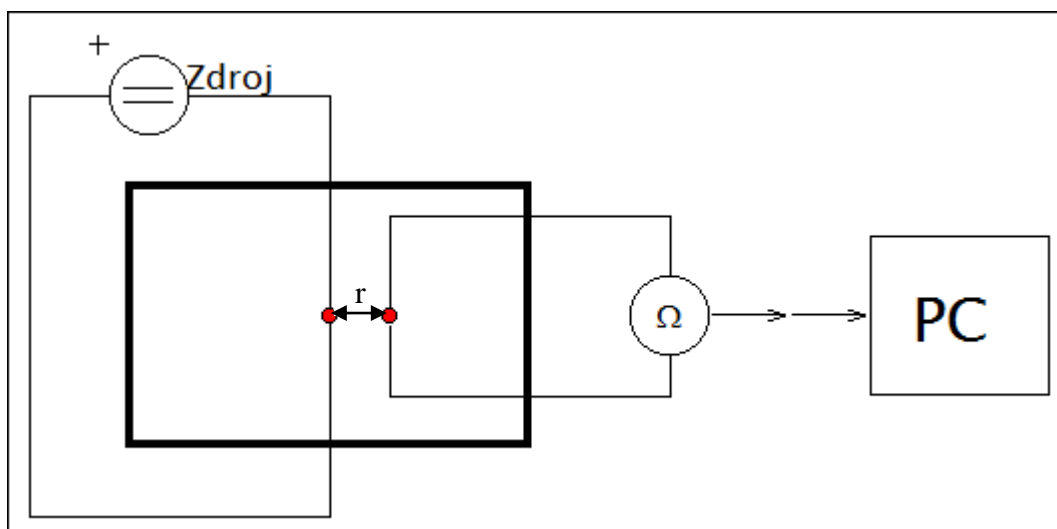
### 3.2 Přípravek s bodovým zdrojem

Pro poslední sérii měření byl zhotoven přípravek s připevněným tranzistorem představujícím bodový zdroj. Ten byl připevněn ke stejnému vzorku, na kterém je připevněn lineový zdroj. Rozměry přípravku tedy jsou přibližně 25 x 15 x 7 cm.

Jako zdroj byl použit tranzistor KC509 s pouzdrem T11, který je dostatečně malý (průměr 4,75 mm) a umožňuje tepelné ztráty 300 mW. Pro nejlepší možný kontakt byla do vzorku vyvrtána díra, aby byl celý tranzistor vsazen dovnitř. Plánované přilepení bylo pomocí lepicího tmelu, který se používá ve stavebnictví, kvůli jeho hrubé struktuře bylo jeho použití nemožné a byla použita sádra. Díky tomuto optimálnímu kontaktu můžeme překročit tepelné ztráty tranzistoru, protože pro krátká měření se měřený vzorek chová jako chladič.

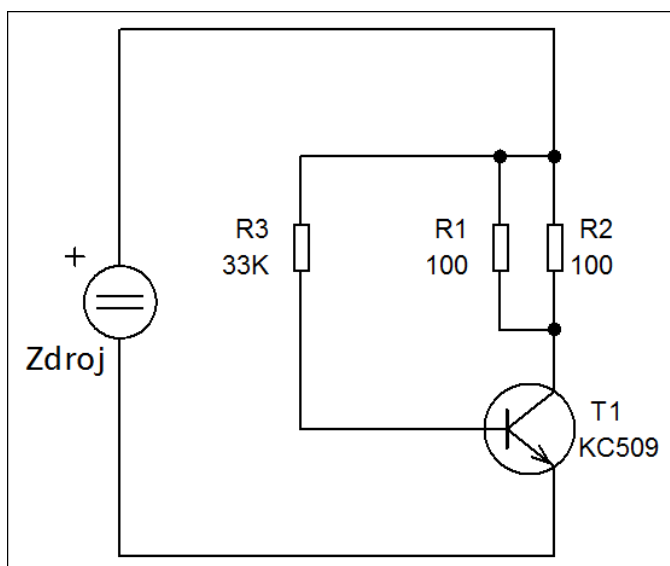
Podobně jako u měření s lineárním zdrojem nejsou teplotní čidla přilepena, ale lze je umístit do libovolné vzdálenosti od zdroje. Tato vzdálenost by však neměla být větší než 6,4 cm vzhledem k požadavku polonekonečnosti uvedenému v kapitole 2.2. Opět je pro maximální odstínění vlivu okolí tepelné čidlo přikryto vrstvou minerální vaty.

**Obrázek č. 2: Schéma měřícího přípravku s bodovým zdrojem**



r...vzdálenost čidla od zdroje

**Obrázek č. 3: Schéma zapojení tranzistoru u měřícího přípravku s bodovým zdrojem**



## 4 Postup měření

### 4.1 Přípravek s liniovým zdrojem

1a) U přípravků pálené cihly a vápenopískové cihly, kde je čidlo (termistor) pevně přilepeno k povrchu, jej přikryjeme vrstvou minerální vaty, aby co nejvíce zabránila proudění vzduchu na povrchu. Na vývody čidla připevníme krokosvorky, které se znovu přikryjí vrstvou minerální vaty. Je to z důvodu, aby byly zakryty vyčnívající přívody termistoru. Bylo totiž ověřeno, že pokud zůstaly odkryté, měření bylo více ovlivněno okolím. Poté se ke krokosvorkám připojí multimetr Agilent 33410A (disponuje USB portem pro snadné připojení k počítači).

1b) U pórobetonu není čidlo přilepené k povrchu, můžeme jej umístit do libovolné vzdálenosti. Můžeme si také vybrat, zda budeme měřit pomocí PT čidla, nebo pomocí termistoru. Na přípravek do námi vybrané vzdálenosti nanese malé množství teplovodivé pasty a čidlo zde připevníme (například gumičkou). Následně jej zakryjeme vrstvou minerální vaty, kterou také připevníme, aby se nepohybovala a nemohl pod ní proudit vzduch. K čidlu připojíme multimetr Agilent 33410A.

2) V tomto kroku připojíme zdroj TTi CPX400SP k odporovému drátu. Výkon nastavíme pomocí proudového omezení (např. 5 A), napětí odečteme v průběhu měření z druhého multimetru připojeného ke zdroji (proud zobrazovaný na zdroji byl několikrát ověřen, jeho hodnota je správná, avšak hodnota napětí se liší oproti hodnotě změřené multimetrem).

3) Minerální vatou můžeme přikrýt prostor mezi odporovým drátem a termistorem. Celý přípravek také můžeme přikrýt krabicí.

4) Zapneme PC, připojíme USB kabel multimetru a zapneme program LabVIEW signal express. Multimetr nastavíme tímto postupem: Add step → Acquire sinals → IVI Aquire → IVI DMM Acquire. Vybereme multimetr Agilent 33410A a zvolíme měření odporu (dvouvodičové).

5) Zapneme měření (pouze zkušebně) a sledujeme průběh odporu. Jakmile se jeho hodnota dostatečně ustálí, znamená to, že je ustálena i teplota a můžeme měřit. Vypneme tedy toto měření a připravíme se zapnout nové.

6) Ve stejný okamžik zapneme měření i zdroj (tlačítkem Output) a po časovém intervalu  $\Delta t$  vypneme zdroj (opět tlačítkem Output), měření však necháváme zapnuté. V době, kdy byl zapnutý zdroj, také sledujeme napětí na multimetru a zapíšeme si jeho hodnotu (pokud se měnilo, zapíšeme více hodnot a zprůměrujeme je). Díky naměřenému napětí a proudu nastaveného proudovým omezením známe tepelný výkon na odporovém drátu.

7) Po dostatečně dlouhé době můžeme měření vypnout a tabulku exportovat do souboru xls. K vypnutí může dojít po dosažení maximální teploty, pro lepší porovnání se simulací by k němu mělo dojít přibližně v době, která je rovna dvojnásobnému času potřebnému pro její dosažení.



8) Alternativně můžeme místo komplexního programu LabVIEW signal express použít jednoduchou aplikaci pro záznam dat vytvořenou v LabVIEW (je v elektronické příloze), která pro tato měření plně dostačuje.

## 4.2 Přípravek s bodovým zdrojem

1) U přípravku s bodovým zdrojem není čidlo přilepené, postupujeme tedy obdobně jako u pórobetonu s liniovým zdrojem – vybereme si čidlo, do požadované vzdálenosti nanese teplovodivou pastu, připevníme čidlo, přikryjeme jej minerální vatou a připojíme multimetr Agilent 33410A.

2) K přívodním vodičům tranzistoru připojíme zdroj napětí. Výkon se nastavuje pomocí napětí, který by neměl být tentokrát proudově omezen. Abychom nepřekročili maximální kolektorový proud tranzistoru, je nutné používat napětí maximálně 11 V. Optimální napětí tedy je 10 až 11 V (čím větší napětí, tím větší je tepelný puls).

3) – 8) Stejný postup jako u liniového zdroje

Pro účely laboratorní úlohy se postup mírně liší vzhledem k úpravám provedeným na laboratorním přípravku – ke zdroji i čidlu byly připevněny konektory, takže není nutné používat krokosvorky. Čidlo bylo pevně připevněno k povrchu, aby s ním studenti nemuseli manipulovat a nedopouštěli se zbytečných chyb měření.

Pro výpočty použijeme tyto hodnoty:

Vápenopísková cihla:  $\rho = 1780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $b = 14 \text{ cm}$ ,  
 $r = 3 \text{ cm}$

Pálená cihla:  $\rho = 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c = 878 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $b = 14 \text{ cm}$ ,  
 $r = 2,9 \text{ cm}$

Pórobeton Ytong:  $\rho = 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $c = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $b = 15 \text{ cm}$ ,  
 $r$  je volitelné, čidlo není přilepeno

## 5 Seznam přístrojů, přípravků, dokumentace

Pálená cihla s připevněným odporovým drátkem a termistorem

Vápenopísková cihla s připevněným odporovým drátkem a termistorem

Vzorek z pórobetonu Ytong s připevněným odporovým drátkem a tranzistorem

Multimetr Agilent 33410A (disponuje USB konektorem)

Další multimetr pro měření napětí – např. Agilent 33401A nebo UT804

Zdroj TTI CPX400SP

PC, USB kabel, LabVIEW SignalExpress nebo LabVIEW (požívaná verze 2014)

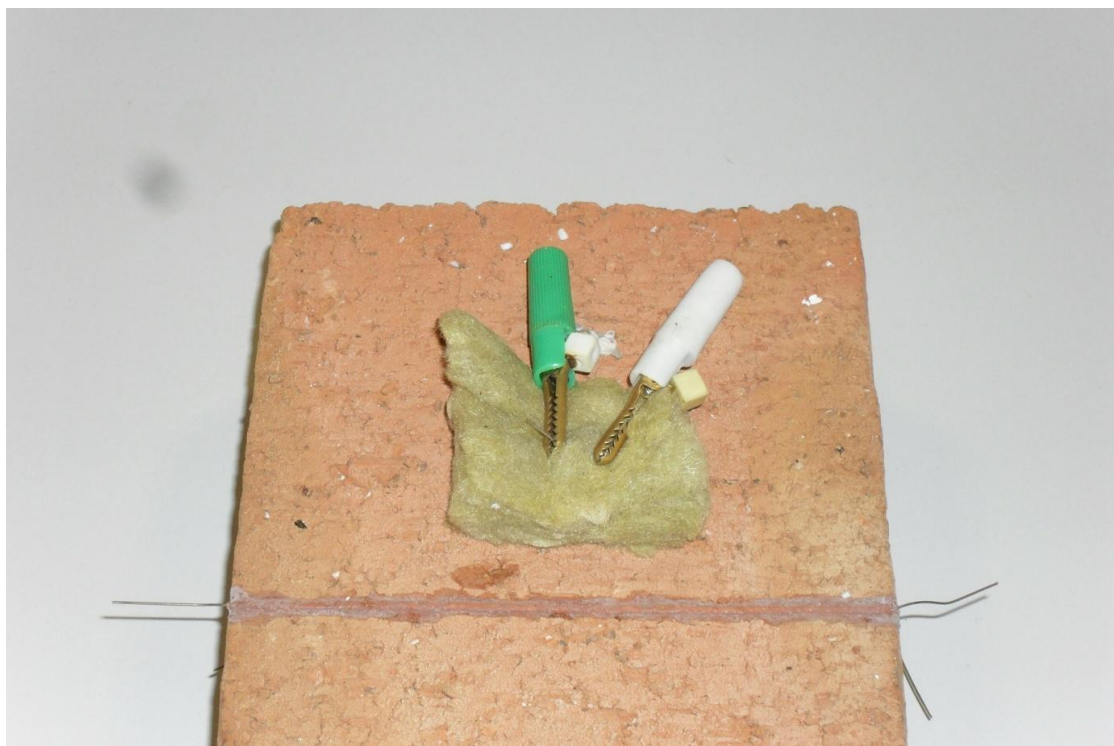
Jofra ETC-125 A (pro přeměření termistoru)

Termokamera Fluke Ti55

**Obrázek č. 4: Pálená cihla s připevněným odporovým drátkem a termistorem**



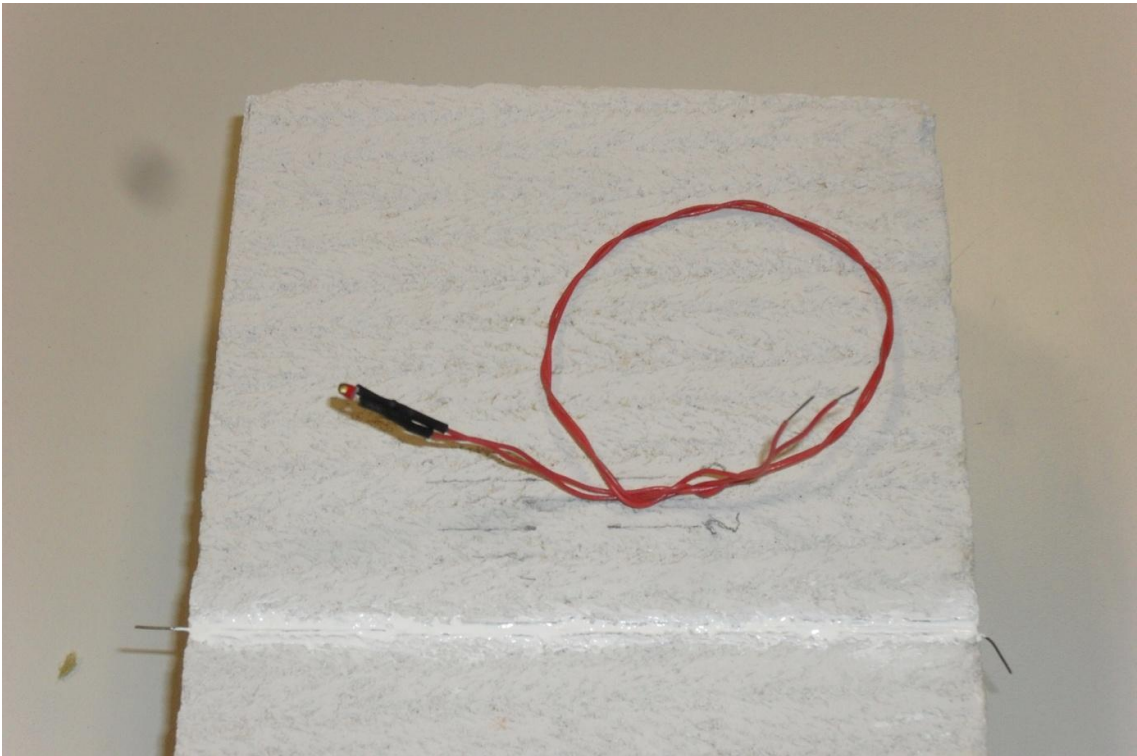
**Obrázek č. 5: Pálená cihla s připevněným odporovým drátkem a termistorem s izolací**



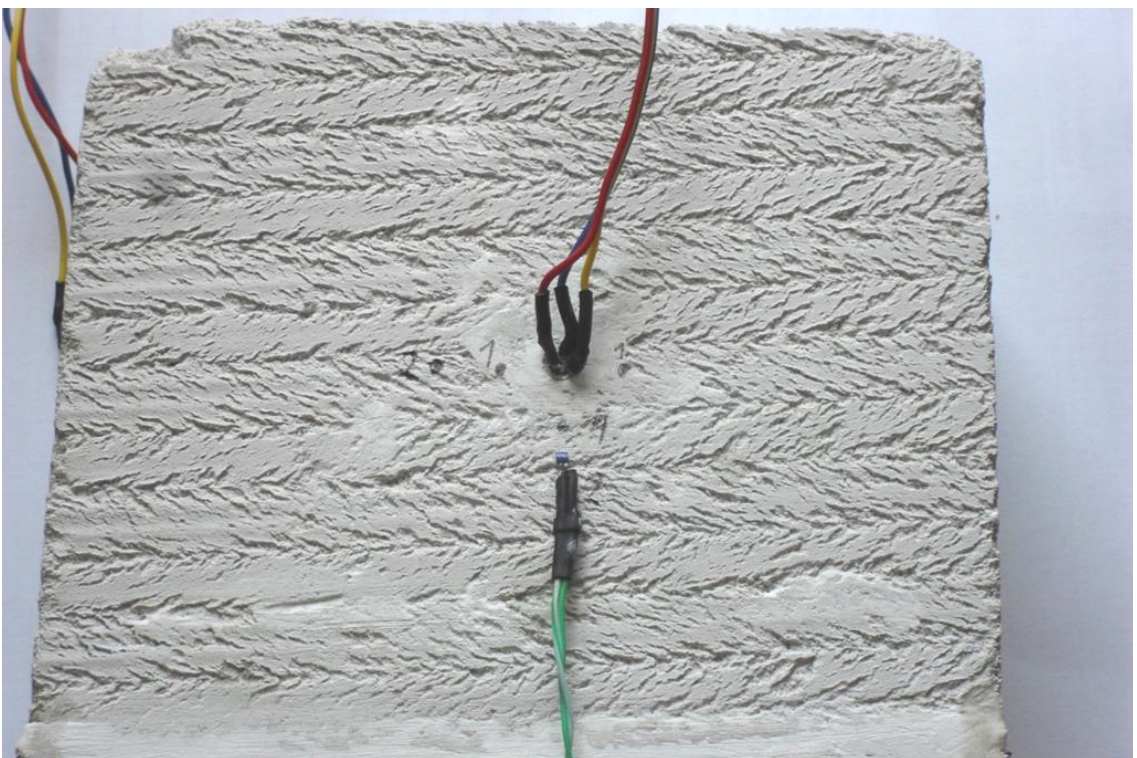
**Obrázek č. 6: Vápenopísková cihla s připevněným odporovým drátkem a termistorem**



**Obrázek č. 7: Vzorek z pórobetonu Ytong s připevněným odporovým drátkem**



**Obrázek č. 8: Vzorek z pórobetonu Ytong s připevněným bodovým zdrojem a přiloženým PT čidlem**

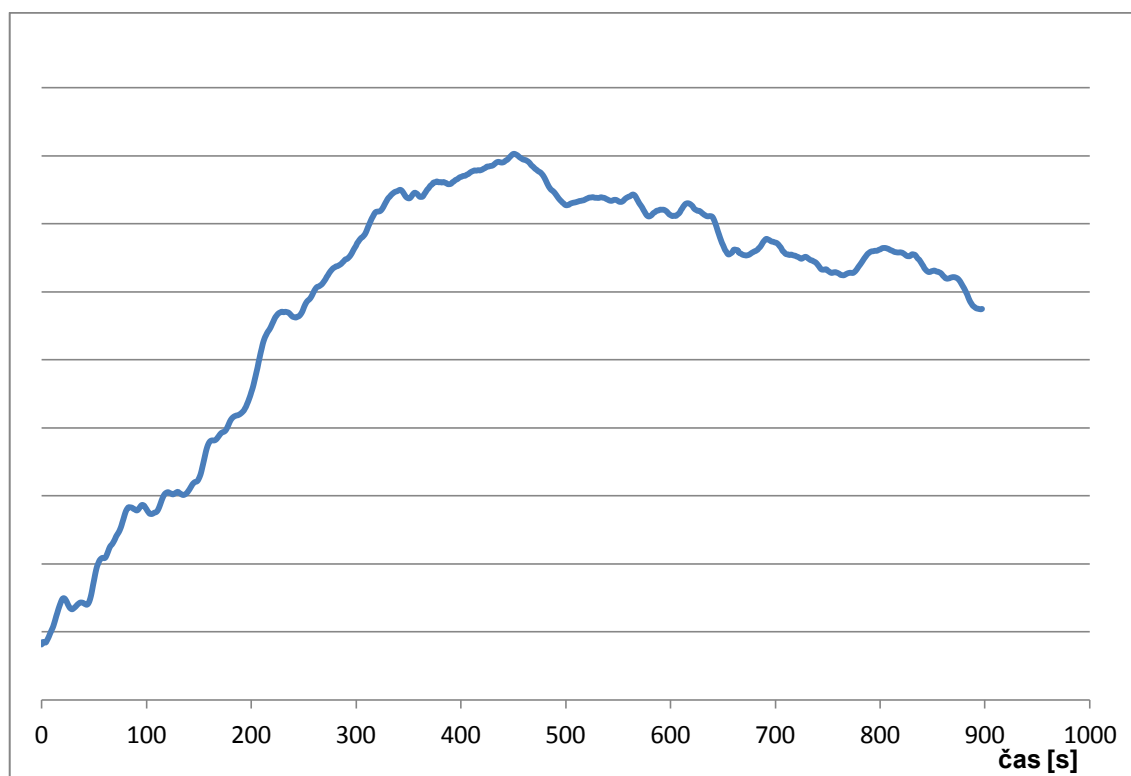


## 6 Měření s liniovým zdrojem

### 6.1 Měření s pálenou cihlou - dříve zhotovený vzorek

První měření proběhla na již dříve zhotoveném přípravku pálené cihly, kde však byl odporový drát připevněn pomocí lepidla. To však neumožňovalo použít vyšší výkon pro krátké pulsy, protože se roztékalo, také nedrželo drátek po celé délce, proto byl přenos tepla nerovnoměrný. Měření na tomto přípravku byla spíše pokusná pro seznámení s metodou a měřící metodikou.

**Graf č. 1: Původní vzorek pálené cihly,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $U = 1,45 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 60 \text{ s}$ , termistor**



Pozn: U tohoto grafu není zobrazeno měřítko teploty, jedná se o seznamovací měření, důležitý je naměřený tvar křivky

## 6.2 Měření s vápenopískovou cihlou

Další měření probíhala na vápenopískové cihle, kam byl umístěn termistor s proměřenou charakteristikou. Měření bylo provedeno v kalibrační peci Jofra pro rozsah 10 - 30 °C s krokem 2,5 °C. Byly zapsány hodnoty odporu při těchto teplotách, které byly následně proloženy exponenciální křivkou. Zpětným procesem je do této rovnice dosazována hodnota odporu a získáme teplotu vzorku.

U prvních měření se vyskytoval problém s amplitudou naměřených tepelných pulsů, která byla vyšší, než měla být dle simulace, kterou jsem prováděl na základě analytické rovnice v softwaru MATLAB. Později byl tento problém vysvětlen, je mu věnována pozornost v také v kapitole 6.5 - Termistor, kde jsou uvedeny i jeho změřené parametry. Následující grafy jsou vykresleny po odstranění této nepřijemnosti.

### Parametry vápenopískové cihly <sup>[5]</sup>:

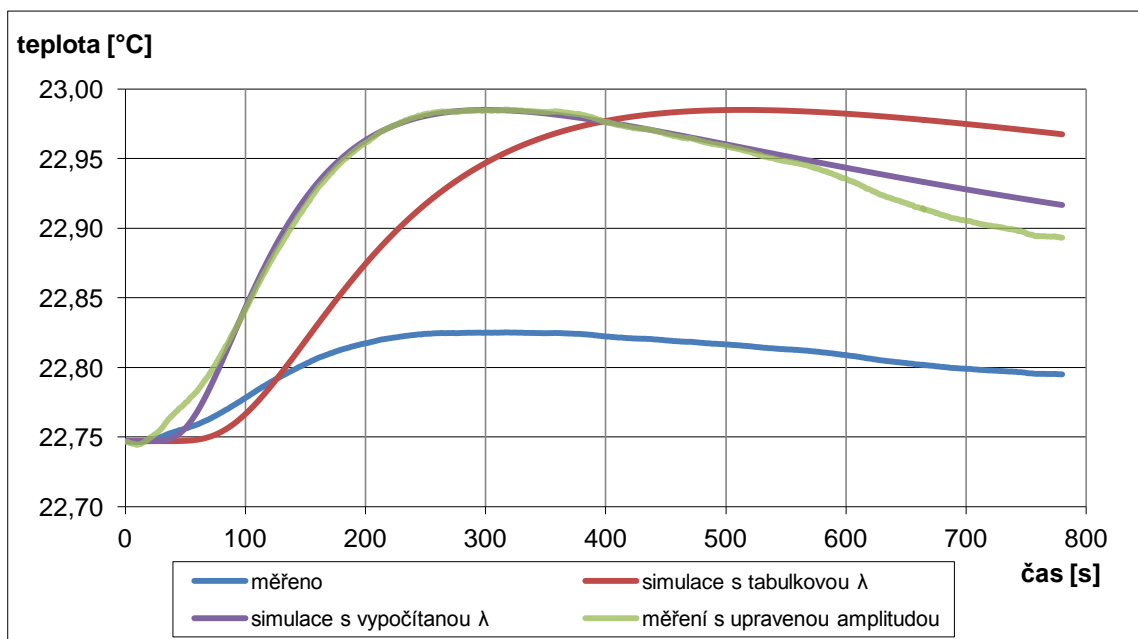
$$\rho = 1780 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\lambda = 0,78 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo s délkou pulsu 30 s, který disponoval dostatečnou amplitudou tepelného pulsu a malým vlivem šumu. Ve výpočtu tepelné vodivosti je však nutné respektovat délku pulsu, protože doba maxima nesplňuje podmínku  $t_m > 50 \cdot \Delta t$ .

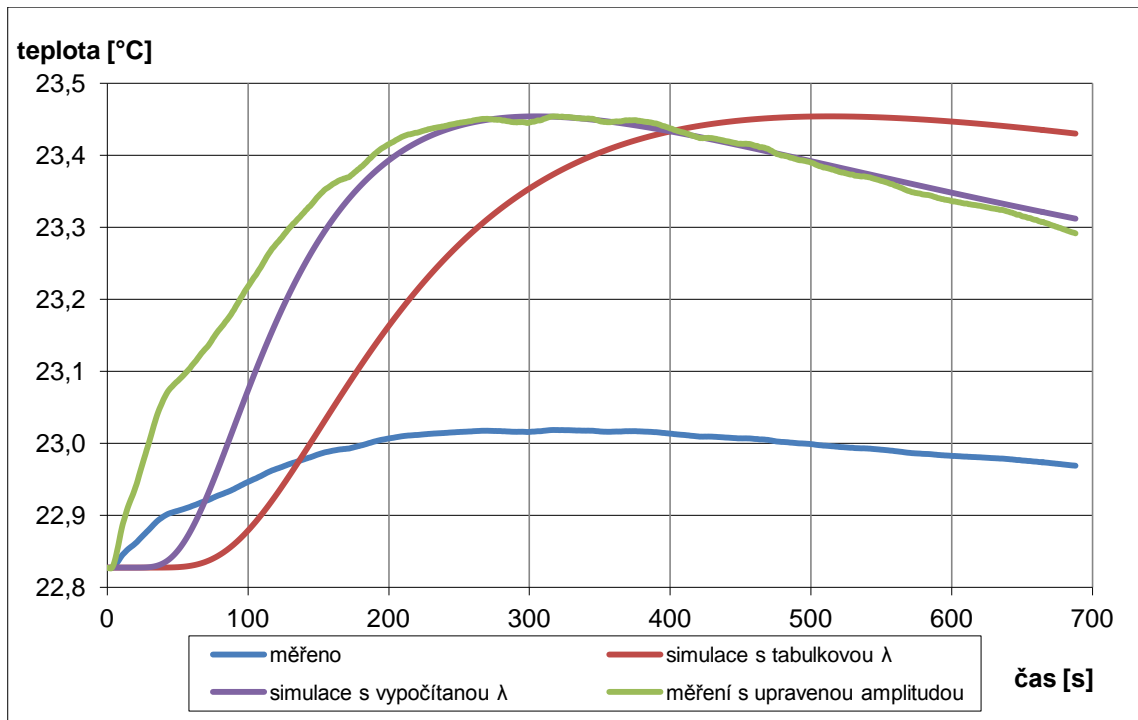
Graf č. 2: Vápenopísková cihla,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $U = 1,52 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ , termistor



Podmínky měření: Větší odporový drátek, izolace na termistoru i drátku

Výsledek:  $t_m = 316 \text{ s}$ ,  $\lambda = 1,331 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  dle vztahu (8) (vztah respektující délku pulsu).

**Graf č. 3: Vápenopísková cihla,  $I = 8 \text{ A}$ ,  $U = 2,5 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ , termistor**



Podmínky měření: Větší odporový drátek, izolace na termistoru i drátku

Výsledek:  $t_m = 320 \text{ s}$ ,  $\lambda = 1,314 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Obě měření stejné délky pulsu, ale s různými výkony, prokázala podobné výsledky. U obou měření dosahuje naměřená křivka nižší amplitudy, než křivka získaná simulací dle rovnice (7). Může to být způsobeno chybou v simulaci, špatně naměřenými vstupními parametry simulace (napětí, proud), nebo jevy na povrchu cihly – vyzařování tepla do okolí, odvod tepla přívodními vodiči. Naštěstí v našem výpočtu tepelné vodivosti tento faktor nehraje roli.

V obou měřeních byla naměřena vyšší tepelná vodivost (přibližně  $\lambda = 1,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , což je o více než 60% oproti hodnotě udávané výrobcem). V grafech se to projevuje tím, že měřená křivka dosáhne teplotního maxima dříve, než křivka získaná simulací s tabulkovou hodnotou. Pokud do simulace dosadíme změřenou hodnotu tepelné vodivosti a sjednotíme amplitudu měřené křivky a simulované, získáme velmi podobné výsledky.

Krátce po začátku měření se křivky liší, hodnoty měřené se nachází nad simulovanými. Je to způsobeno tím, že jde o reálný puls, který není nekonečně krátký a na křivce je poznat, že došlo k vypnutí zdroje a hodnoty nenarůstají tak strmě. U vyššího výkonu se křivky liší markantněji, proto se takto vysoké proudy (a tedy i výkony) nevyplácí používat. Zřejmě docházelo k příjmu tepelného záření a teplo se nešířilo pouze vzorkem.

### 6.3 Měření s pálenou cihlou

Další měření byla provedena na přípravku pálené cihly s cílem zjistit, zda dosáhneme lepších výsledků než s vápenopískovou cihlou. Charakteristika termistoru byla tentokrát změřena s asistencí počítače, byl tedy k dispozici celkový průběh teploty měření 10 až 30 °C s krokem 2,5 °C, ze kterého byl nakonec kvůli přesnosti nakonec vybrán rozsah 15 – 25 °C (který pro účely tohoto měření dostačuje). Opět byla naměřena vyšší amplituda tepelné vlny než dle simulace, následující grafy jsou také až po vyřešení tohoto problému.

#### Parametry pálené cihly:

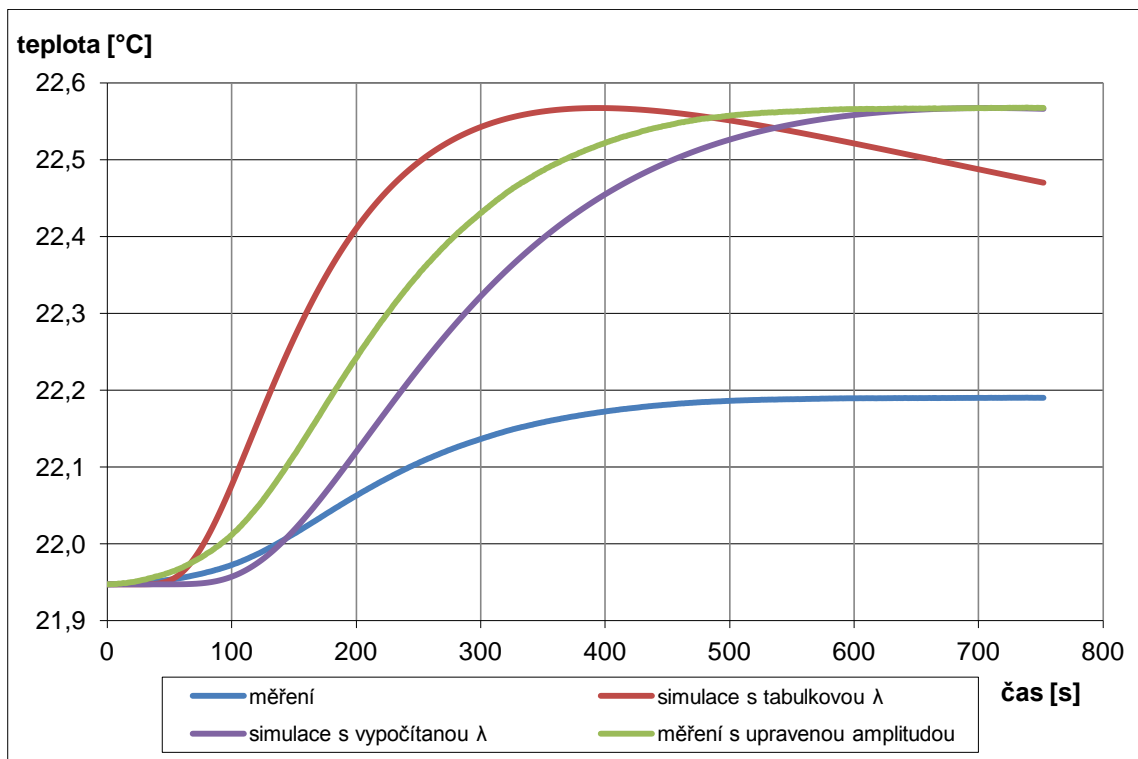
Parametry použité pálené cihly jsou těžko dostupné, protože nebyl znám její výrobce, bylo nutné je získat z několika zdrojů (je nutné tyto parametry brát s rezervou).

$$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3 \text{ [6]}$$

$$c = 878 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \text{ [7]}$$

$$\lambda = 0,75 \text{ W/m} \cdot \text{K} \text{ [7]}$$

Graf č.4: Pálená cihla,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $U = 1,459 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 60 \text{ s}$ , termistor

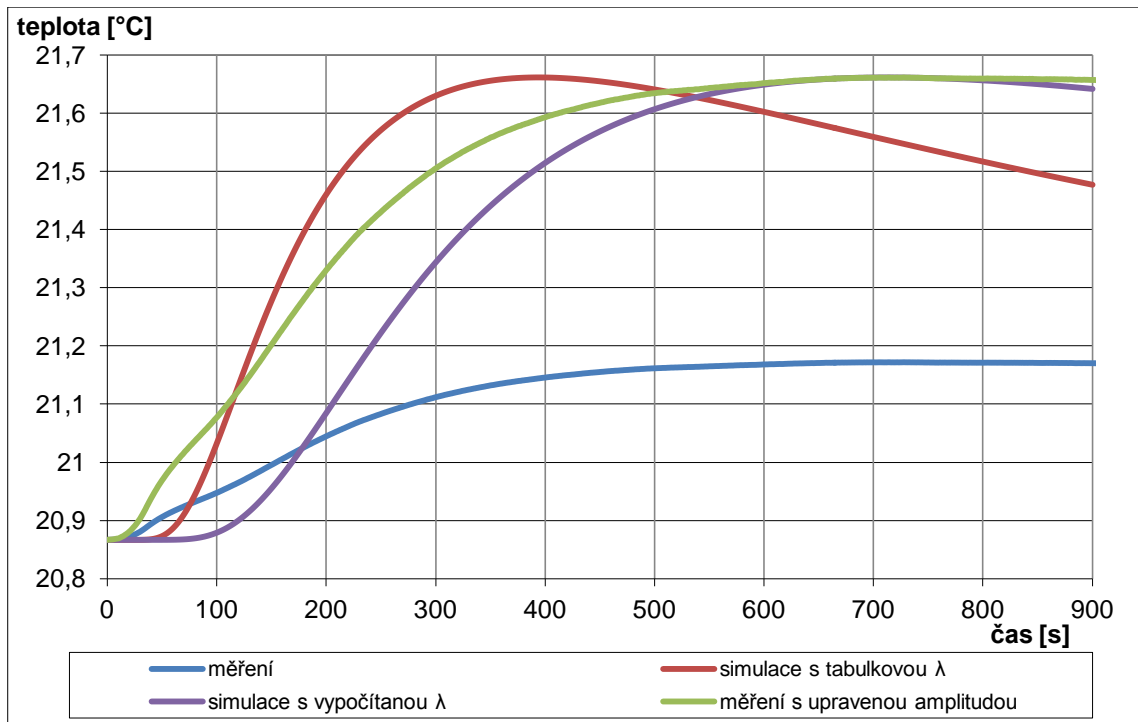


Podmínky měření: izolace na termistoru i drátku, zakryto krabicí

Výsledek:  $t_m = 739 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0,417 \text{ W/m} \cdot \text{K}$



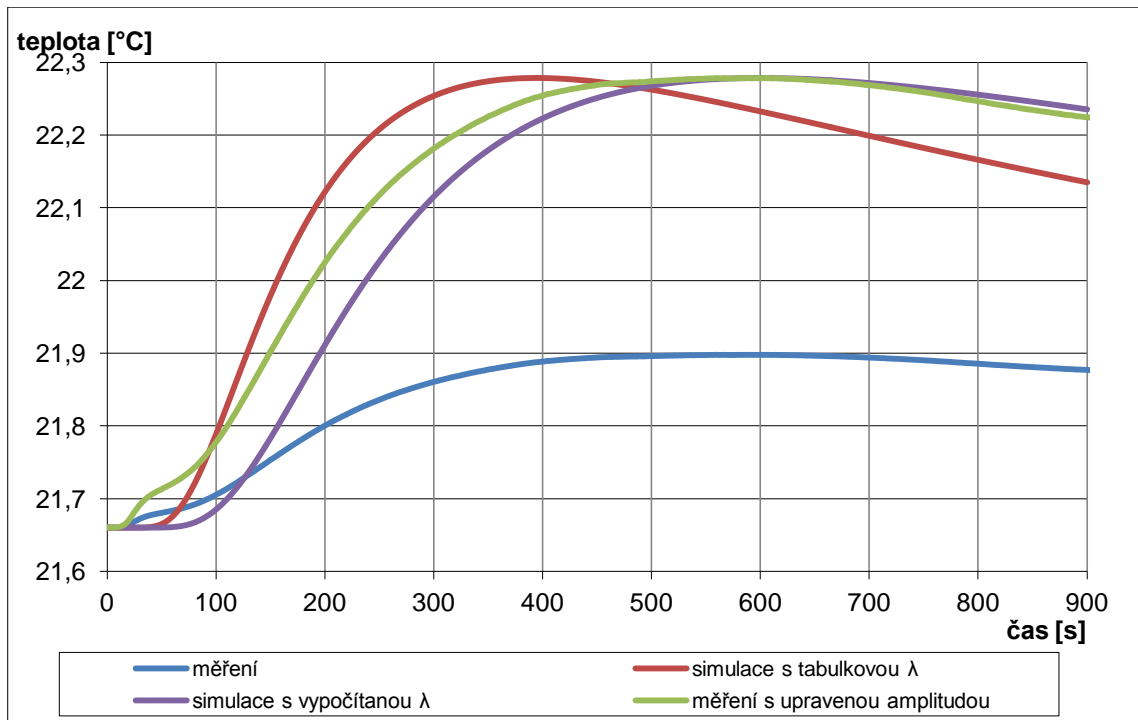
**Graf č. 5: Pálená cihla,  $I = 8 \text{ A}$ ,  $U = 2,337 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ , termistor**



Podmínky měření: izolace na termistoru i drátku, zakrytí krabicí

Výsledek:  $t_m = 728 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0,3869 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

**Graf č. 6: Pálená cihla,  $I = 10 \text{ A}$ ,  $U = 2,91 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 15 \text{ s}$ , termistor**



Podmínky měření: izolace na termistoru i drátku, zakrytí krabicí

Výsledek:  $t_m = 607 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0,4602 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Měření s pálenou cihlou se shodují s měřením s vápenopískovou cihlou v tom, že amplituda naměřeného pulsu je nižší, než lze očekávat dle simulace. Opět lze tvrdit, že nižší amplituda může být způsobena zářením do okolí, odvodem tepla přívodními vodiči, nebo nevhodnou simulací. Důležité je, že měřená amplituda není vyšší a není to tak v rozporu s fyzikální podstatou a naše výsledky to neovlivňuje.

U všech měření s pálenou cihlou však byla zaznamenána nižší tepelná vodivost (přibližně  $\lambda = 0,42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , tedy zhruba o 40% nižší), což je naopak, než tomu bylo v případě vápenopískové cihly. Nejpravděpodobnějším zdrojem tohoto rozdílu je neznalost přesných parametrů této pálené cihly. Jak bylo řečeno v úvodu, musíme je brát s rezervou. Dokonce křivky získané simulací pro naměřenou hodnotu tepelné vodivosti je liší podstatně více, než u vápenopískové cihly, proto jsem se dále rozhodl, že se pálená cihla pro další měření nebude používat.

U krátkých pulsů s vysokým výkonem je opět znatelné kolísání teploty po vypnutí zdroje, zatímco u pulsu s malým výkonem to nelze rozpoznat. Simulace však předpokládají nekonečně krátký puls, proto je nutné zdůraznit, že křivky s vyšším výkonem a vyšším kolísáním teploty na začátku měření více odpovídají simulacím (kromě tohoto intervalu na začátku měření).

## 6.4 Měření s pórobetonem Ytong

Jelikož jsem u dvou předchozích materiálů dospěl k rozdílným výsledkům, rozhodl jsem se pro použití dalšího materiálu. Zvolen byl pórobeton, u kterého jsou na rozdíl od pálené cihly známy parametry udávané výrobcem, takže se na srovnání můžeme spolehnout podobně, jako u vápenopískové cihly.

Byl použit stejný typ termistoru se stejnými problémy jako u předchozích měření (vyšší amplituda tepelného pulsu), zde jsou uvedeny grafy již bez těchto nepřesností. Dokonce pro vyloučení chyby simulace v MATLABu byly provedeny i simulace výpočetním systémem COMSOL.

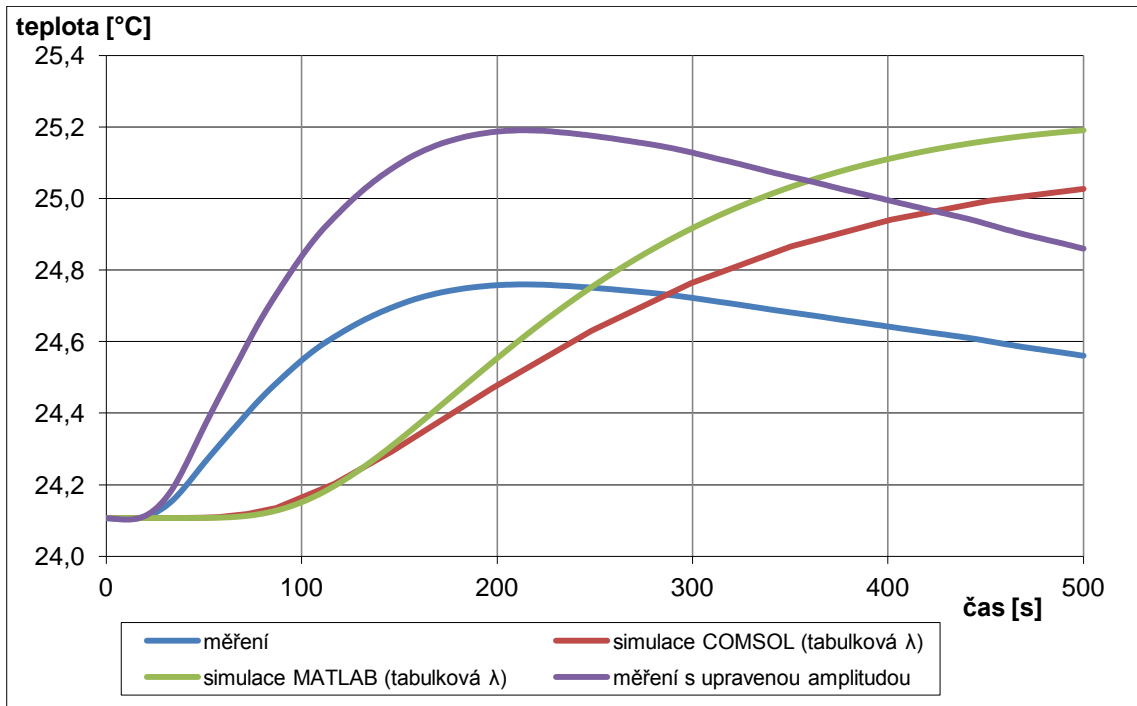
### Parametry pórobetonu Ytong <sup>[8]</sup>:

$$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$$

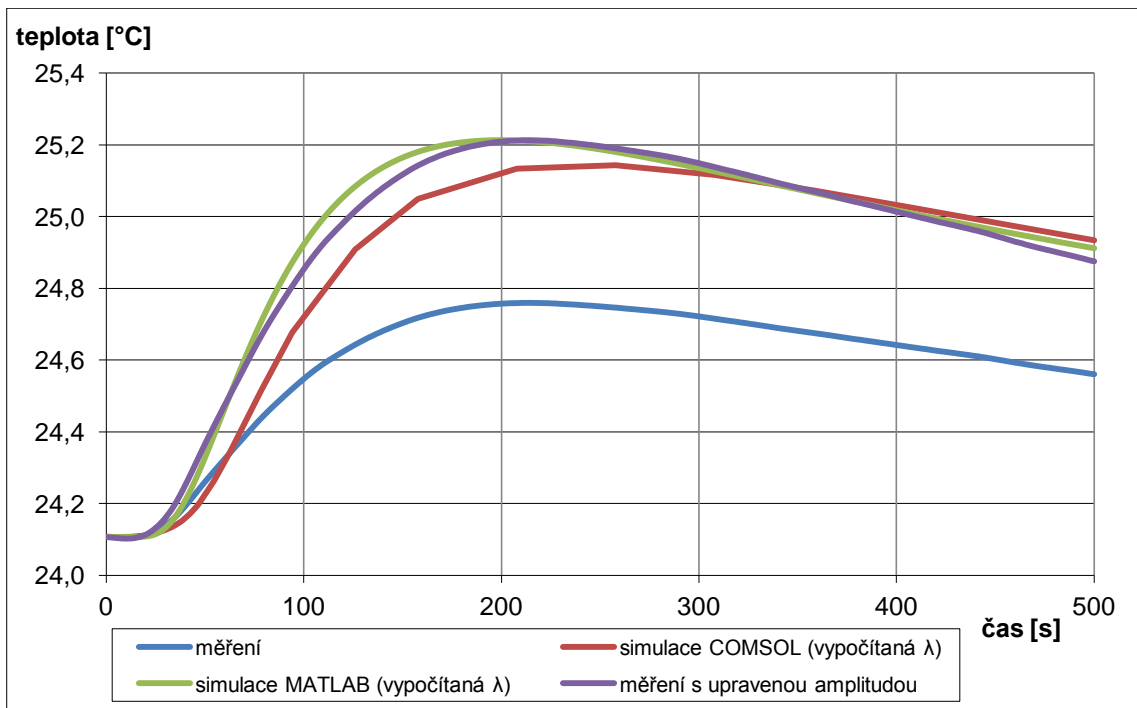
$$c = 1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$\lambda = 0,137 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

**Graf č. 7: Ytong,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $U = 1,524 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ ,  $r = 2,5 \text{ cm}$ , termistor (porovnání se simulací dle tabulkové hodnoty)**



**Graf č. 8: Ytong,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $U = 1,524 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ ,  $r = 2,5 \text{ cm}$ , termistor (porovnání se simulací dle vypočítané hodnoty)**



Podmínky měření: izolace na termistoru i drátku, zakryto krabicí, termistor připevněn pomocí pasty (nepřilepen)

Výsledek:  $t_m = 215 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0,391 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Pro přehlednost bylo porovnání výsledků se simulacemi rozděleno do dvou grafů. V prvním grafu, kde jsou simulace s tabulkovými hodnotami, vidíme znatelný rozdíl v tepelné vodivosti. Byla naměřena přibližně trojnásobná tepelná vodivost, což má za vinu dřívější dosažení teplotního maxima.

V druhém grafu, kde byla do simulací dosazena vypočítaná hodnota tepelné vodivosti, jsou si křivky podobné jako u měření s vápenopískovou cihlou. U experimentů s vápenopískovou cihlou také vycházela vyšší tepelná vodivost. Je tedy otázkou, zda je tato metoda měření takto nepřesná, nebo zda se dopouštím nějaké chyby.

V grafech můžeme také porovnat výsledky simulací, které byly provedeny pro stejné podmínky. Křivky jsou si poměrně podobné, takže můžeme vyloučit nějakou fatální chybu v simulacích. Simulace v COMSOLu má nižší amplitudu tepelného pulsu, což více odpovídá nám naměřeným teplotním křivkám. Dokonce je v ní zahrnuta délka tepelného pulsu, nepředpokládá nekonečně krátký puls jako simulace v MATLABu, což lépe vyhovuje skutečné situaci (pro delší pulsy by byl rozdíl markantnější). Bohužel se nejedná o analytickou rovnici, a řešení takové simulace trvá podstatně déle a v průběhu křivky vidíme několik zlomů (které znamenají nepřesnost), což jsou nevýhody této simulace. Je tedy nutné se zamyslet nad tím, jaká simulace je pro nás v dané chvíli podstatnější.

## 6.5 Termistor

Jak bylo zmíněno na začátku předchozích kapitol, u všech měření se objevoval problém s větším nárůstem teploty, než který bychom dle simulace měli očekávat. Pro metodu určení tepelné vodivosti vycházející z času dosažení teplotního maxima není velikost teploty důležitá, ale je v rozporu s fyzikální podstatou, proto bylo vhodné tento problém odstranit. Například může docházet k samoohřevu, což by v konečném důsledku znamenalo chybu při měření tepelné vodivosti.

Použitím jiného výpočetního softwaru se podařilo vyloučit chybu v simulaci, proto jsem se zaměřil na vlastnosti termistoru. Mezi nejpravděpodobnější faktory lze zařadit samoohřev termistoru, tepelné rušení a nevhodně provedenou aproximace.

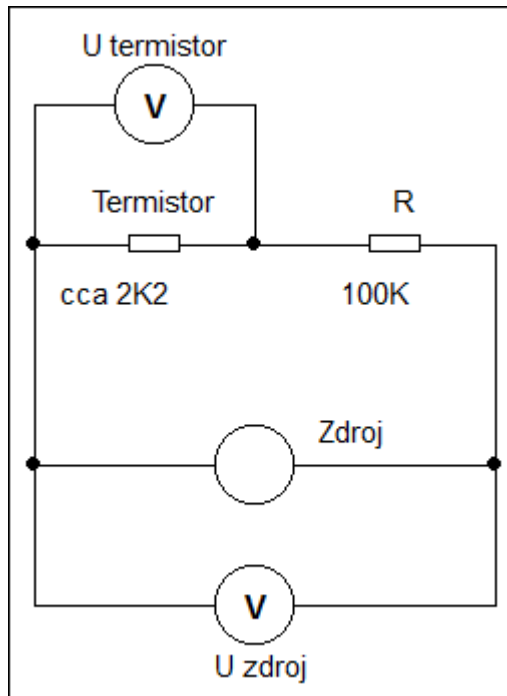
Tepelné rušení se úspěšně podařilo eliminovat použitím izolace ve formě minerální vaty, díky čemuž se křivka vyhladila a ani po přiložení ruky do blízkého okolí vzorku se odpor termistoru nemění. Minerální vatou však musí být přikrytý celý termistor včetně jeho zakončovacích vodičů (za připojenými krokosvorkami k multimetru).

Zkoumání samoohřevu nás má ujistit v tom, že měřicí proud multimetru sám neohřívá termistor a tím nezvyšuje měřenou amplitudu teploty a také například časově neposouvá hodnotu tepelného maxima důležitého pro určení tepelné vodivosti.

Měřicí proud při měření odporu dvou vodičovou metodou má u rozsahu 10 kΩ hodnotu 100 μA. Nás budou zajímat nižší hodnoty proudu a to, zda i při nich má termistor stejný odpor. U těchto hodnot s nižším proudem by při samoohřevu mělo docházet k menšímu oteplování a velikost odporu by byla jiná. Bylo provedeno měření

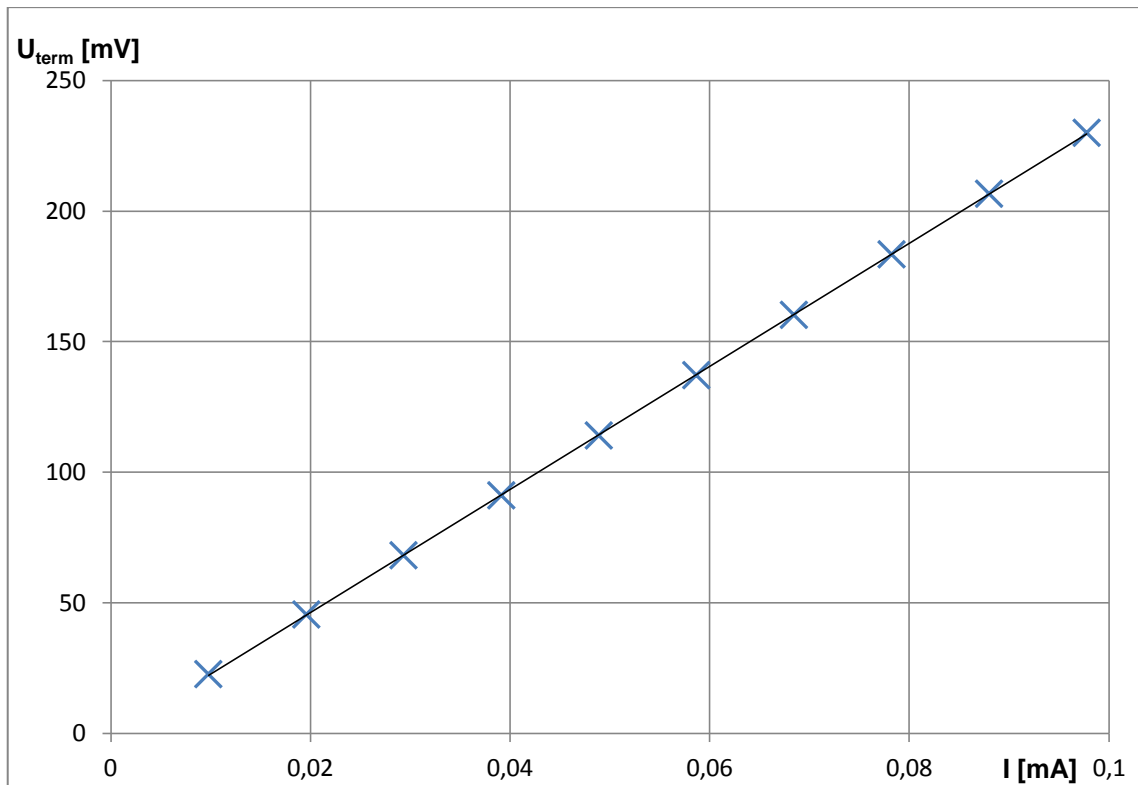
s předřadným odporem  $100\text{ k}\Omega$  a pomocí zdroje napětí se podařilo nastavovat proud v rozsahu přibližně  $10 - 100\ \mu\text{A}$  s nastavením napětí  $1 - 10\text{ V}$ .

**Obrázek č. 9: Schéma zapojení pro měření samoohřevu**



Proud tedy závisí na celkovém odporu, tedy  $100\text{ k}\Omega + 2,2\text{ k}\Omega = 102,2\text{ k}\Omega$  (přesněji  $102,27\text{ k}\Omega$ , změřeno multimetrem s měřicím proudem  $10\ \mu\text{A}$ , záleží už na konkrétní teplotě). Pro celkový odpor můžeme proud považovat za konstantní, protože případné změny odporu termistoru jsou vůči odporu  $100\text{ k}\Omega$  zanedbatelné.

**Graf č. 9: Závislost úbytku napětí (na termistoru) na proudu**

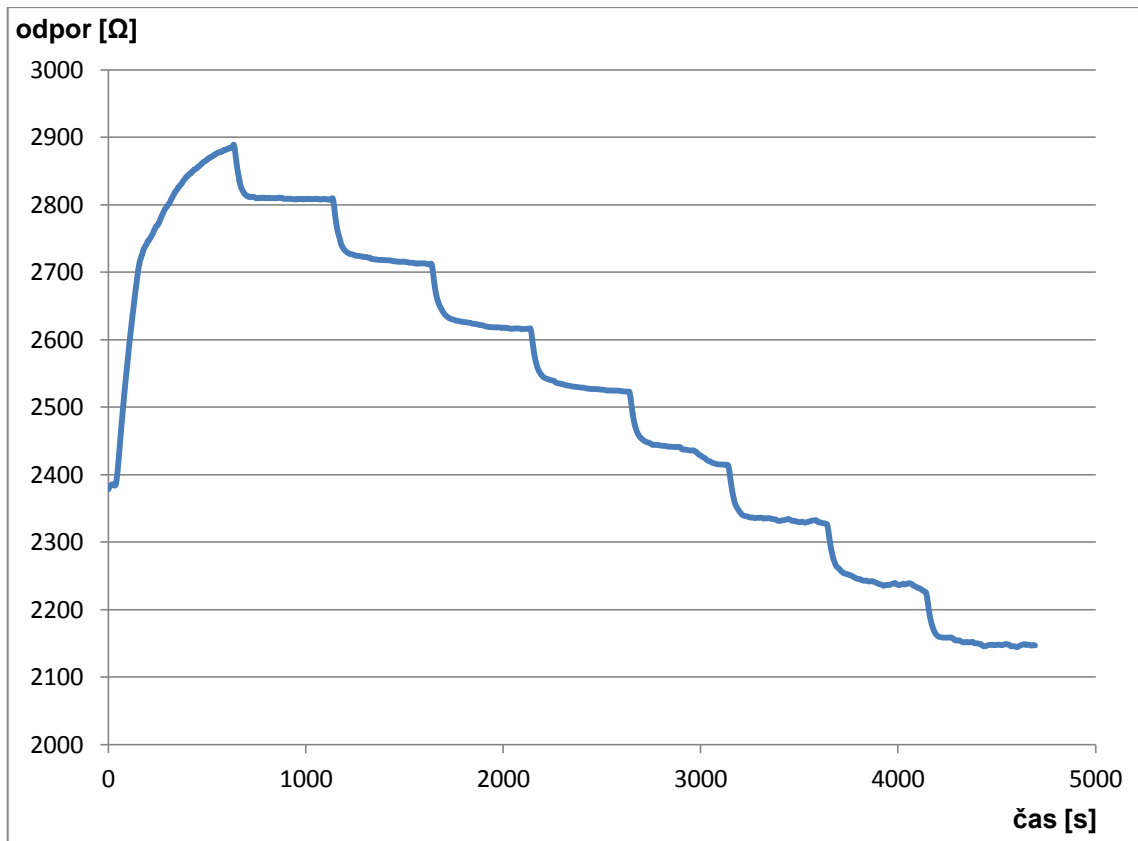


Z vytvořené závislosti není nijak patrné, že by se měnil lineární charakter křivky (tedy odpor je konstantní). Pokud by se termistor zahříval, musel by klesnout jeho odpor a tedy by i klesl úbytek napětí, což se v tomto případě neděje.

Také bylo provedeno měření jiným způsobem. Byl změřen odpor termistoru (měřicí proud  $100 \mu\text{A}$ ), následně hodnota předřadného odporu (měřicí proud  $10 \mu\text{A}$ ) a potom hodnota obou součástí v sériovém zapojení (proud  $5 \mu\text{A}$  nebo  $10 \mu\text{A}$ ). Následně se porovnal odpor v sériovém zapojení a součet samostatných odporů. Toto měření proběhlo 3x a výsledky jsou srovnatelné, jednou byl odpor sériového zapojení vyšší, podruhé nižší. Ani jedno z těchto měření tedy nepotvrdilo efekt samoohřevu termistoru.

Posledním zkoumaným faktorem majícím možný negativní dopad na měření je samostatná aproximace změřené charakteristiky termistoru v tepelné pídce. Při jednom měření charakteristiky termistoru se z hlediska chyb jevílo přesnější lineární proložení naměřených bodů místo exponenciálního, což je v rozporu s fyzikální podstatou termistoru. Určitá chyba tedy nastala při měření v kalibrační komůrce. Zde je ilustračně přiložen průběh měření termistoru:

**Graf č. 10: Měření charakteristiky termistoru**

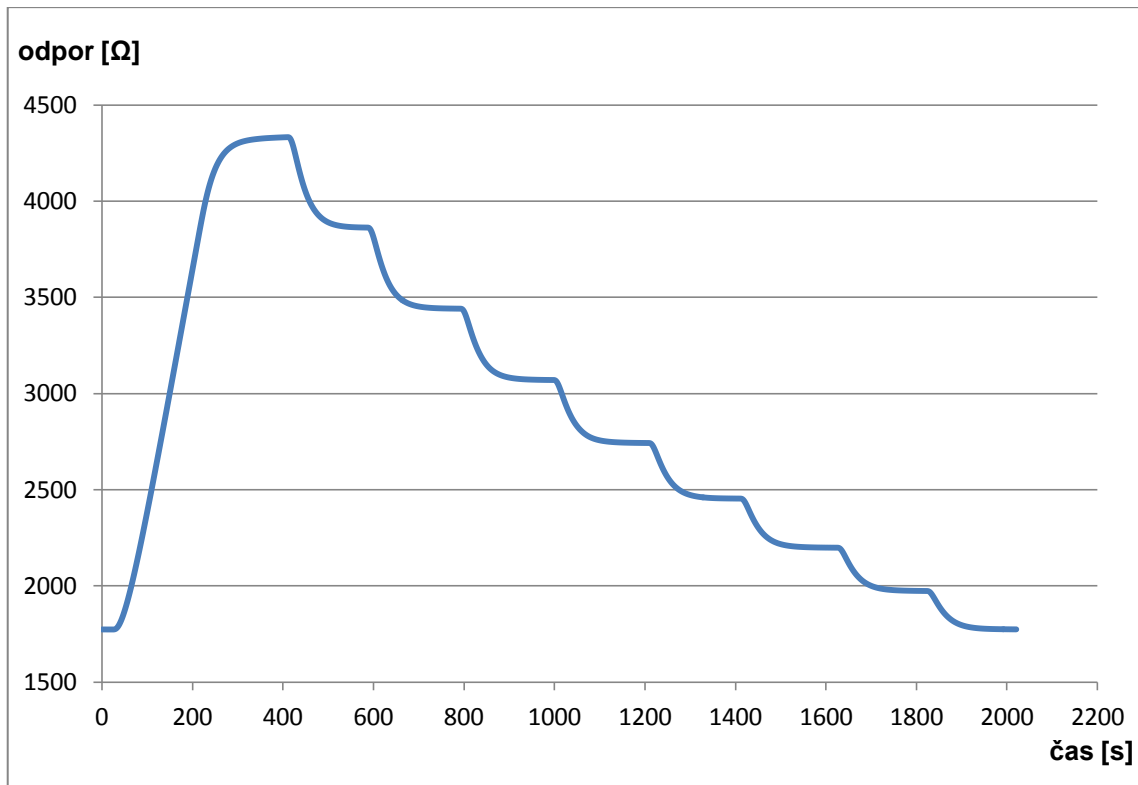


Jedná se o interval hodnot 10 až 30 °C s krokem 2,5 °C. Hodnota pro 10 °C byla doměřena samostatně, hodnota odporu pro ostatní hodnoty byla brána jako průměr několika hodnot z „nejlínarnejší“ části naměřené charakteristiky. Po proložení exponenciálou a zkoumání odchylky byla relativní odchylka od křivky 0,1 - 0,2 °C (kromě krajních hodnot, proto byl používán středový interval), což ale stále nevysvětlovalo rozdíl simulované a naměřené teploty.

Příčinou toho, že naměřená amplituda tepelné vlny byla příliš vysoká, byla špatně změřená charakteristika termistoru v kalibrační píce – termistor nebyl při měření zasunut až na její dno a tím byla naměřená charakteristika neplatná. Po novém změření již byla charakteristika termistoru exponenciální, ale i tak dochází po proložení křivkou k relativním chybám až 0,1 °C v měřených bodech, což při amplitudách kolem 1 °C hraje roli. Při určování tepelné vodivosti zvolenou metodou však nezávisí na hodnotě maxima, ta se odvíjí pouze od doby jejího dosažení.

Na dalším grafu už je charakteristika naměřená při správném umístění termistoru v kalibrační píce:

**Graf č. 11: Nové měření charakteristiky termistoru**



Po tomto posledním měření parametrů termistoru vidíme znatelný rozdíl, který byl skutečně způsoben nevhodným uložením. Po proložení naměřených bodů metodou nejmenších čtverců exponenciálou byla stanovena převodní rovnice:

$$R = 6739,337 \cdot e^{-0,04473 \cdot t}$$

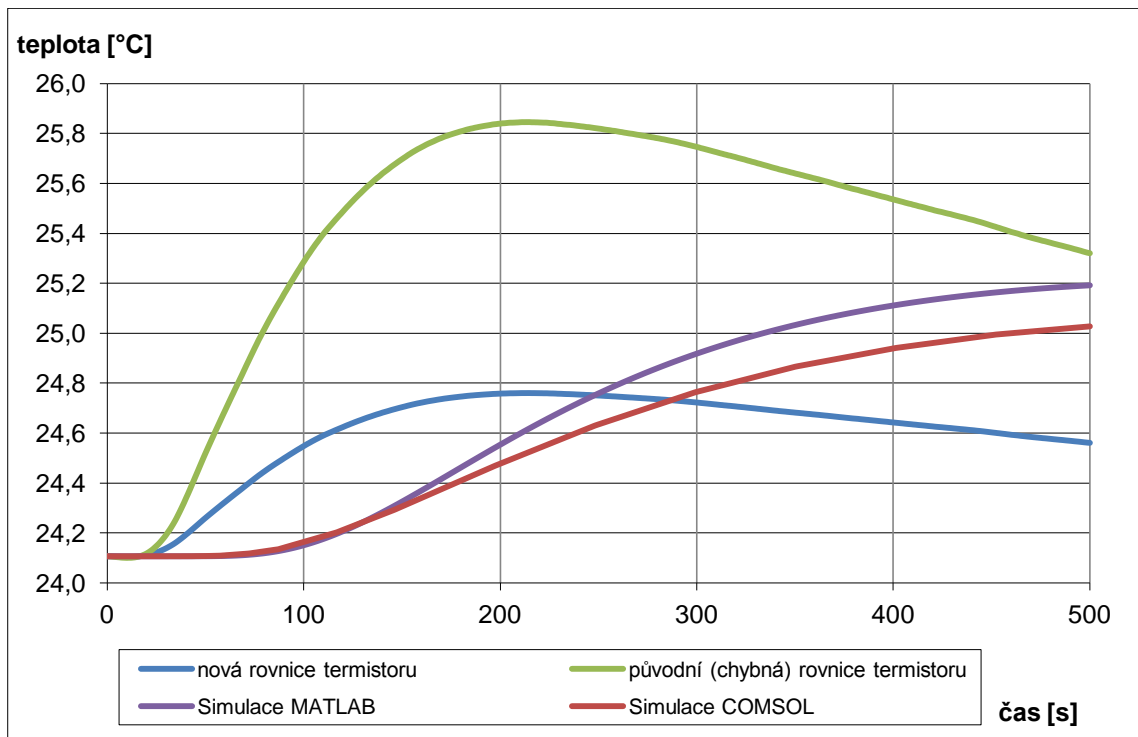
$$t = \frac{-\ln\left(\frac{R}{6739,337}\right)}{0,04473}$$

Tato převodní rovnice je používána u všech výsledků získaných při měření termistorem v této práci. Převodní charakteristiku můžeme také vyjádřit pomocí parametrů  $R_{25} = 2203 \Omega$  a  $\beta = 3833$ .

Na následujícím grafu je dokumentačně zobrazeno, jak měření vypadalo s původně změřeným termistorem a po přeměření.



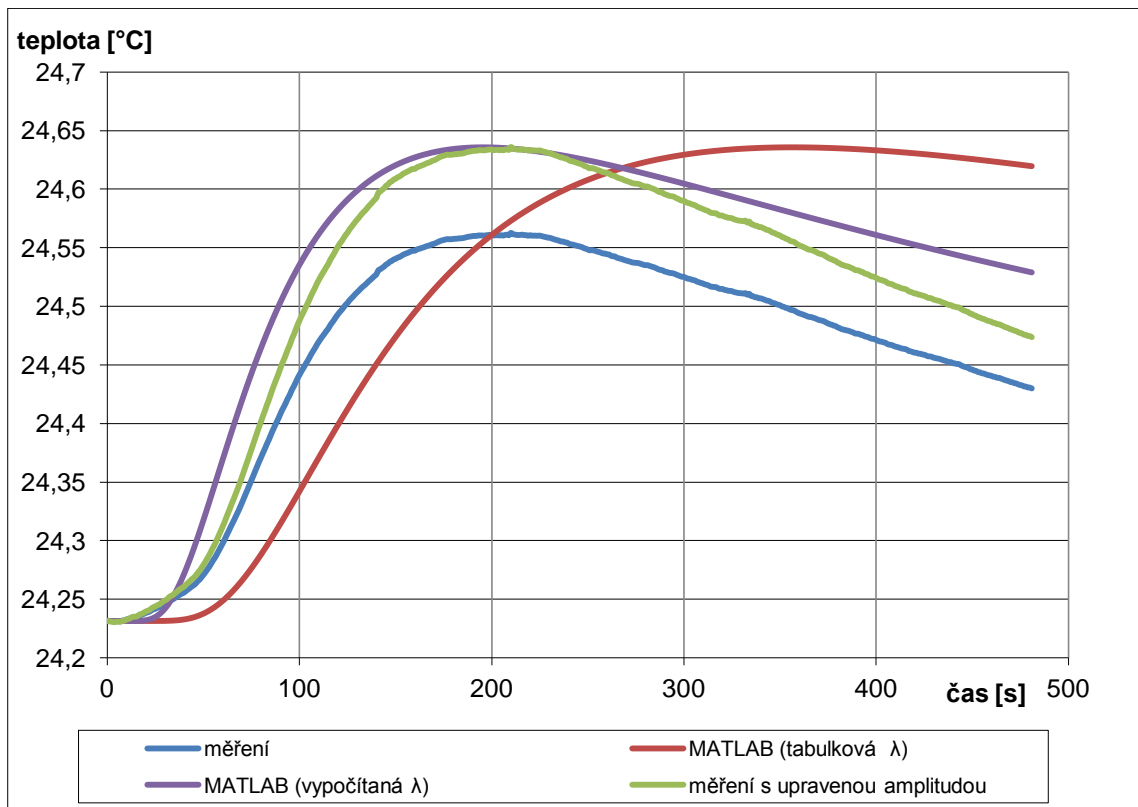
**Graf č. 12: Porovnání průběhu teploty původně a nově přeměřeného termistoru, Ytong,  $I = 5 \text{ A}$ ,  $U = 1,52 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ ,  $r = 2,5 \text{ cm}$ , termistor**



## 6.6 Měření s vápenopískovou cihlou, teplotní senzor Heraeus

Pro další měření byl použit platinový teplotní senzor Heraeus M222<sup>[9]</sup> (parametry  $R_0 = 1000 \Omega$  a  $\alpha = 3850 \text{ ppm/K}$ ), jako materiál byla zvolena vápenopísková cihla, u které nebyl tolik markantní rozdíl mezi měřenou a simulovanou křivkou. I když jsme ověřovali, zda termistor nějakým způsobem neovlivňuje výsledky měření, toto čidlo nás v tom může ujistit. Čidlo se k povrchu přiložilo a pro lepší kontakt bylo nanášeno malé množství teplovodivé pasty, které zajišťuje optimální přenos tepla.

**Graf č. 13: Vápenopísková cihla,  $I = 3 \text{ A}$ ,  $U = 3,401 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$ ,  $r = 2,5 \text{ cm}$ , PT čidlo**



Podmínky měření: izolace na PT čidle, bez zakrytí krabicí

Výsledek:  $t_m = 210 \text{ s}$ ,  $\lambda = 1,430 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

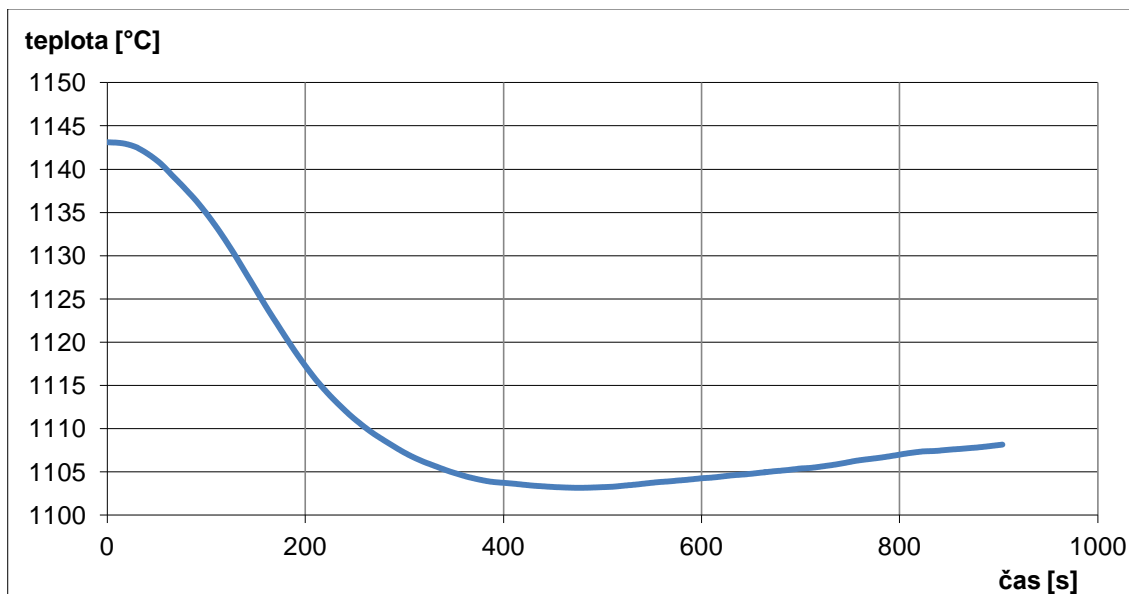
Měření bylo provedeno také ve vzdálenosti čidla od zdroje 3 cm a přípravek byl přikryt krabicí, avšak nedostatečně, pod jejími okraji se nacházela malá mezera. V průběhu měření došlo k pohybu osoby v blízkosti experimentu a ten vykázal odlišnější výsledek ( $\lambda = 1,841 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), z důvodu zmíněných okolností jsou ale známy příčiny tohoto dílčího neúspěchu a můžeme tuto hodnotu označit za neplatnou.

Pro zjištění opakovatelnosti byla obě měření provedena za stejných podmínek, kde se dospělo k výsledkům  $\lambda = 1,491 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  a  $\lambda = 1,422 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , což jsou z hlediska opakovatelnosti přijatelné výsledky, avšak od hodnoty udávané výrobcem se liší. Hodnota udávaná výrobcem je  $0,78 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  při vlhkosti 10 %, měřené hodnoty jsou až o 90% vyšší, lze říci, že měření s termistorem bylo přesnější.

## 6.7 Měření s pálenou cihlou na FAST

Pro poslední sérii měření s liniovým zdrojem byla domluvena návštěva FAST, kde mají pro laboratorní cvičení také zhotovený vzorek z pálené cihly. Bohužel se nepodařilo vypátrat konstanty použitého termistoru, proto nemůžeme měřený odpor přepočítat na teplotu. Byla provedena 3 měření, z nichž jsou výsledky jednoho z nich na následujícím grafu:

**Graf č. 14: Pálená cihla FAST,  $I = 4,09$  A,  $U = 6,19$  V,  $\Delta t = 30$  s,  $r = 3$  cm, termistor**



Podmínky měření: izolace na termistoru (polystyren), bez zakrytí krabicí

Výsledek:  $t_m = 476$  s,  $\lambda = 0,772$  W/m·K

Druhé měření při délce pulsu 60 s prokázalo výsledek 0,821 W/m·K a při měření s pulsem o délce 180 s byla naměřena tepelná vodivost 0,792 W/m·K. Od tabulkové hodnoty 0,75 W/m·K se tyto výsledky liší podstatně méně, než ve všech mých měřeních.

Pokud se začneme soustředit, v čem jsou přípravky jiné, můžeme najít příčinu tohoto rozdílu. Jedním z nich je, že u přípravku na FAST byl odporový drát i termistor přikryt větší vrstvou tmelu, zatímco u mého byla vrstva tmelu nižší a termistor byl přilepen dvousložkovým lepidlem. U vlastního přípravku jsem tedy odstranil lepidlo, nahradil jej tmelem a na odporovém drátku jsem zvýšil vrstvu tmelu, aby byly co nejvíce podobné. Po novém měření nebyl zaznamenán výrazný rozdíl, není to hlavní příčinou chyb.

Odchylna od mých měření je nejpravděpodobněji vysvětlitelná tím, že obě cihly jsou vyrobeny z jiného materiálu. Cihla na FAST může odpovídat materiálu, pro který byly stanoveny tabulkové hodnoty, zatímco cihla pro můj přípravek může být vyrobená z novějších materiálů, které jsou více izolační (opakovaně byla měřena nižší vodivost).

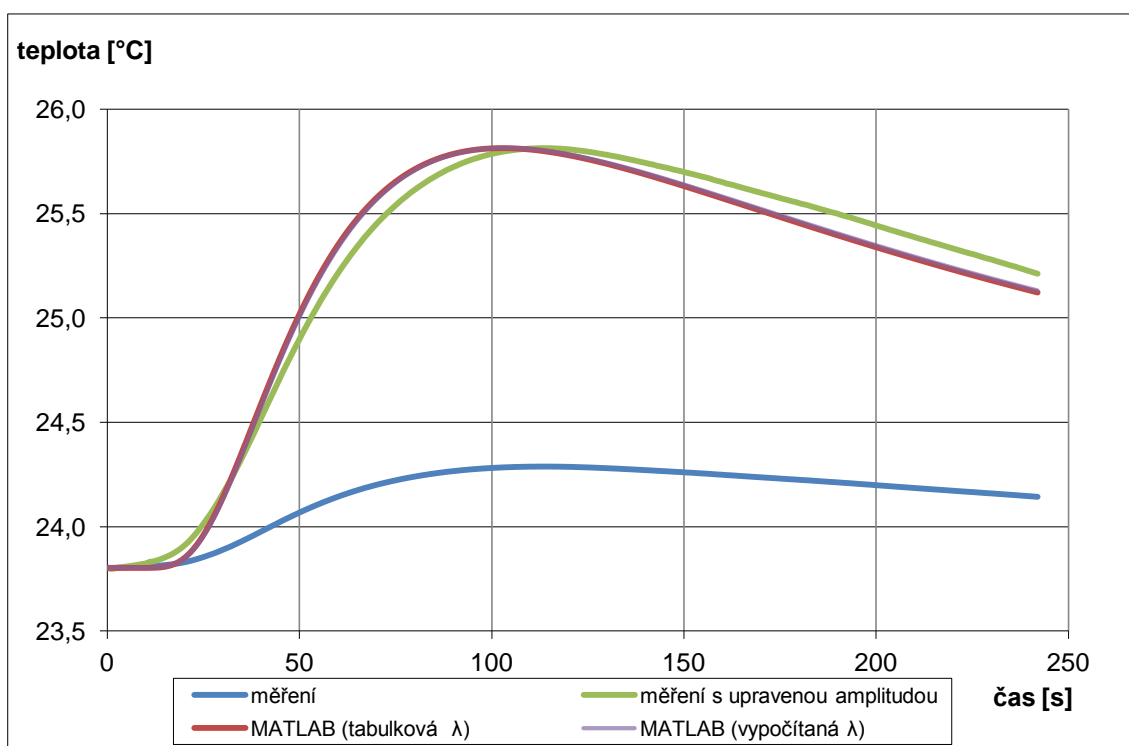
Bohužel se tím ale stále nepodařilo vysvětlit, proč jsou výsledky u pórobetonu i vápenopískové cihly stále odlišné.

## 7 Měření s bodovým zdrojem

Po měřeních se třemi různými materiály s výsledky, které se odchylovaly od tabulkových hodnot a nebyly plně zdůvodnitelné ovlivňujícími faktory, bylo přistoupeno k použití jiného typu zdroje. Rozhodl jsem se pro použití pórobetonu, protože při stejném výkonu zdroje u něj můžeme očekávat vyšší amplitudu tepelného pulsu než u ostatních použitých materiálů (je to způsobeno jeho nižší hustotou vůči ostatním použitým materiálům).

### 7.1 Měření s termistorem

Graf č. 15: Pórobeton Ytong,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 20 \text{ s}$ ,  $r = 1,3 \text{ cm}$ , termistor



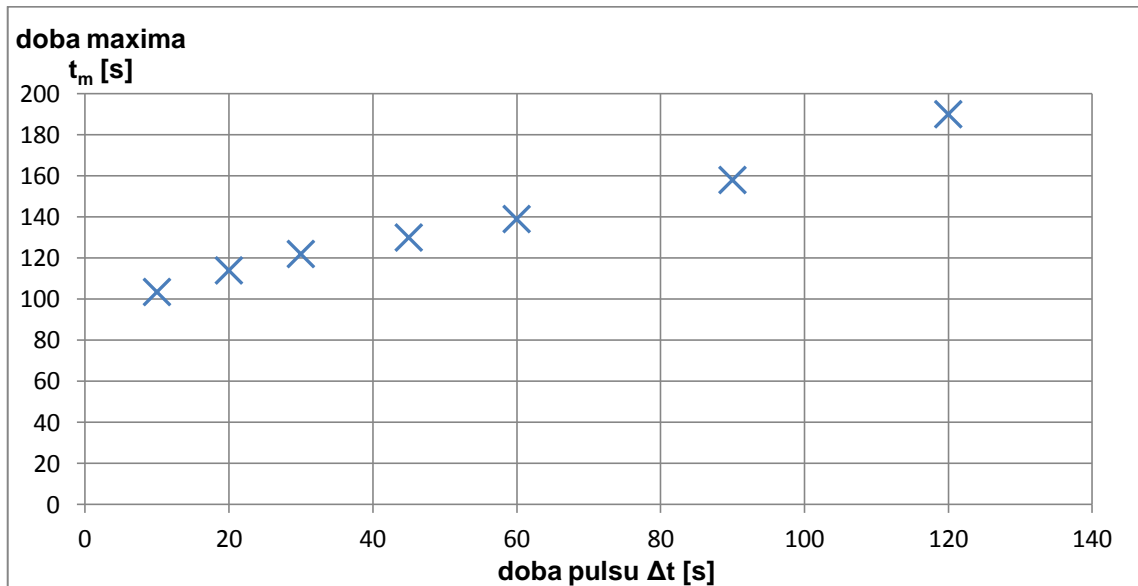
Podmínky měření: izolace na PT čidle, bez zakrytí krabicí

Výsledek:  $t_m = 114 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0,136 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

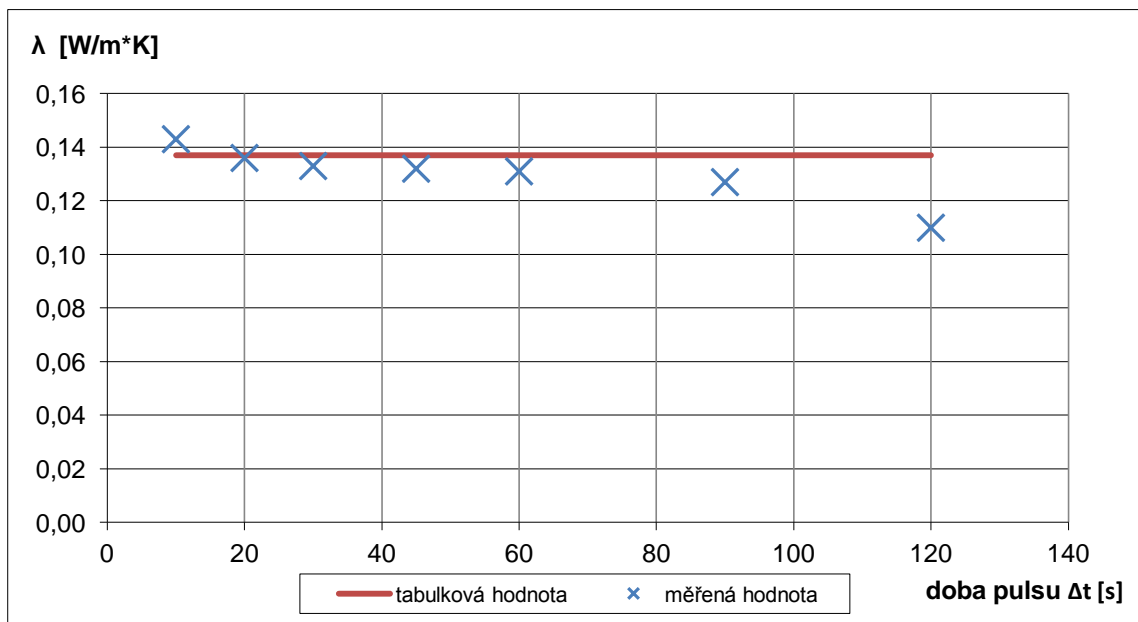
Z tohoto měření je patrné, že výsledek je téměř totožný s tabulkovou hodnotou  $0,137 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Také je ale viditelné, že naměřený tepelný puls má značně menší amplitudu než simulovaný. Opět se můžeme odkázat na tepelné vyzařování, odvod tepla přívodními vodiči nebo špatný odhad výkonu měřeného na tranzistoru. Výkon na tranzistoru jsem určil změřením kolektorového proudu a napětí  $U_{CE}$ . Nejedná se o nejpřesnější metodu, ale zvolená metoda měření tepelné vodivosti nezakládá na skutečné velikosti tepelného pulsu. Pokud ale upravíme amplitudu tak, aby byla stejná se simulovanou, jsou si křivky velmi podobné. Simulovaná křivka se plně neztotožňuje s měřenou, je to způsobeno tím, že tato simulace předpokládá nekonečně krátký puls.

Po tomto poměrně úspěšném měření byla provedena série experimentů pro různé doby teplotního pulsu, abychom mohli zkoumat vliv tohoto parametru na dobu dosažení teplotního maxima a tím pádem i na teplotní vodivost. Pro měření byly zvoleny délky pulsů v intervalu 10 až 120 s, výsledky jsou zobrazeny v následujících grafech.

**Graf č. 16: Pórobeton Ytong,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $r = 1,3 \text{ cm}$ , termistor,  $\Delta t = 10$  až  $120 \text{ s}$  – doba teplotního maxima**



**Graf č. 17: Pórobeton Ytong,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $r = 1,3 \text{ cm}$ , termistor,  $\Delta t = 10$  až  $120 \text{ s}$  – tepelná vodivost**



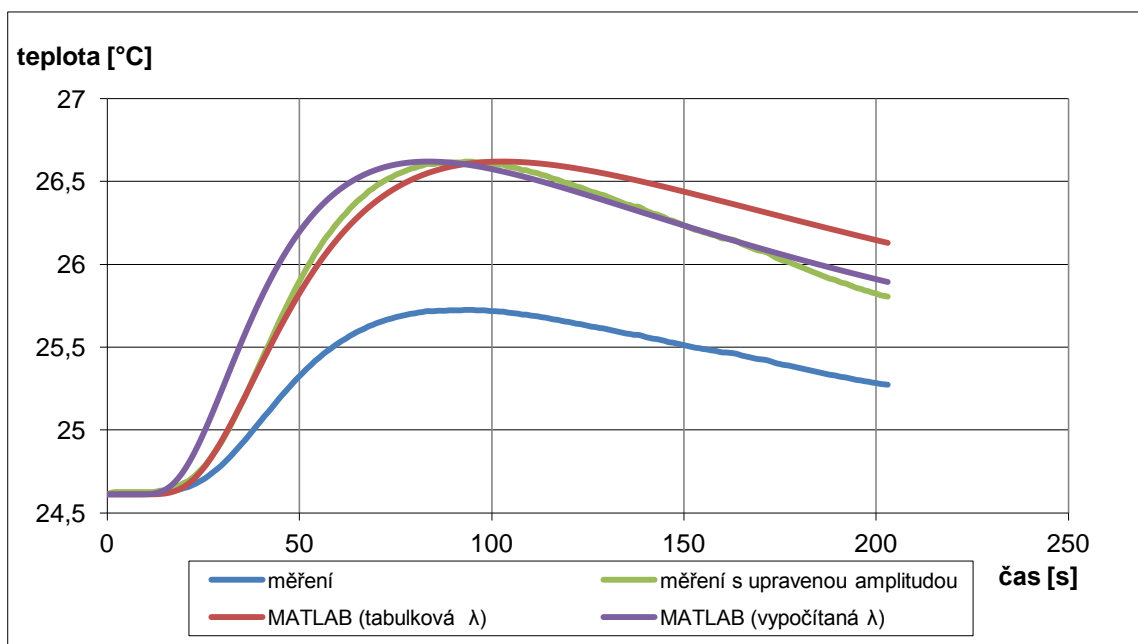
Grafy nám potvrzují teoretické předpoklady o vlivu doby pulsu při měření tepelné vodivosti, tím pádem také potvrzují, že je nutná korekce na tuto dobu, kterou jsme prováděli i u měření s lineárním zdrojem. Pokud bychom korekci nepoužívali,

znamenaloby to, že pro krátké i dlouhé pulsy by měla být naměřená stejná doba dosažení maxima (což je logicky nemožné, když například použijeme delší puls, než je doba dosažení maxima při krátkém pulsu). Všechny hodnoty kromě poslední se dostatečně blíží tabulkové hodnotě (maximální odchylka 10%), v současné chvíli nemůžeme rozhodnout, zda u poslední hodnoty jde o chybu měření, nebo je zvolená nevhodná korekce.

## 7.2 Měření s PT čidlem

Po sérii měření s termistorem byla provedena měření za co nejpodobnějších podmínek také s PT čidlem (bohužel PT čidlo bylo umístěno o 1 mm blíže ke zdroji), abychom zjistili, zda má i teplotní čidlo vliv na měření. Graficky si zde ukážeme měření srovnatelná s měřeními v předchozí kapitole.

**Graf č. 18: Pórobeton Ytong,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $\Delta t = 20 \text{ s}$ ,  $r = 1,2 \text{ cm}$ , PT čidlo**



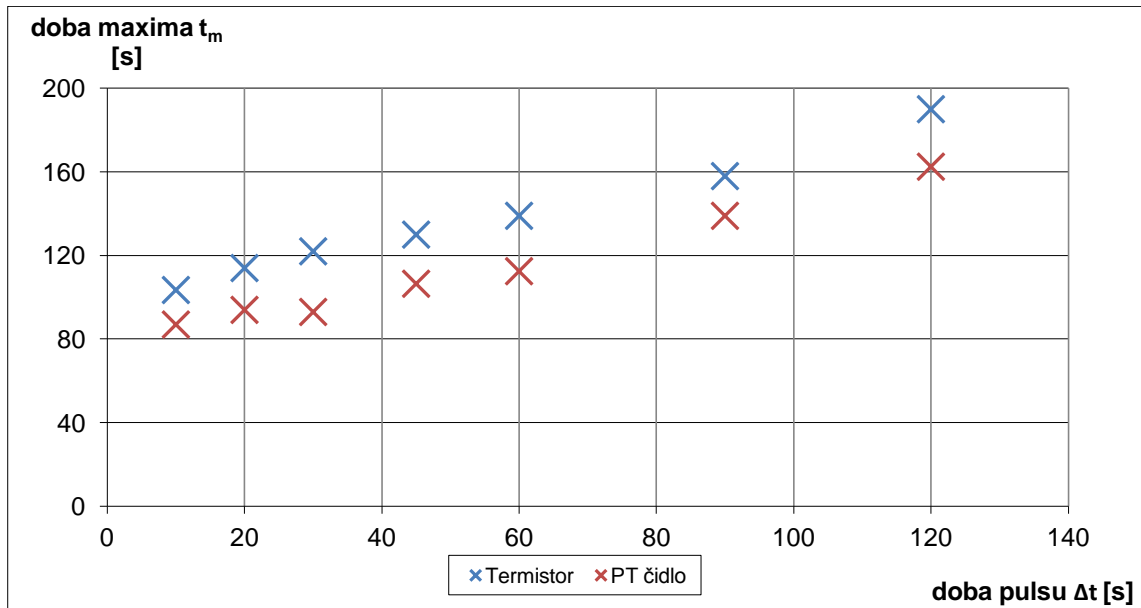
Podmínky měření: izolace na PT čidle, bez zakrytí krabicí

Výsledek:  $t_m = 94 \text{ s}$ ,  $\lambda = 0,144 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

Naměřená hodnota se v tomto případě liší více, než tomu bylo s termistorem, ale stále je velmi blízká tabulkové (je o 5% vyšší). Můžeme si ale všimnout, že amplituda měřené křivky (bez upravené amplitudy) je při měření PT čidlem vyšší, je to nejpravděpodobněji způsobeno geometrickou konstrukcí čidla. Jeho rozměry jsou menší, tedy pro vyrovnání teploty mu stačí méně energie (pokud předpokládáme srovnatelné teplotní vlastnosti čidel).

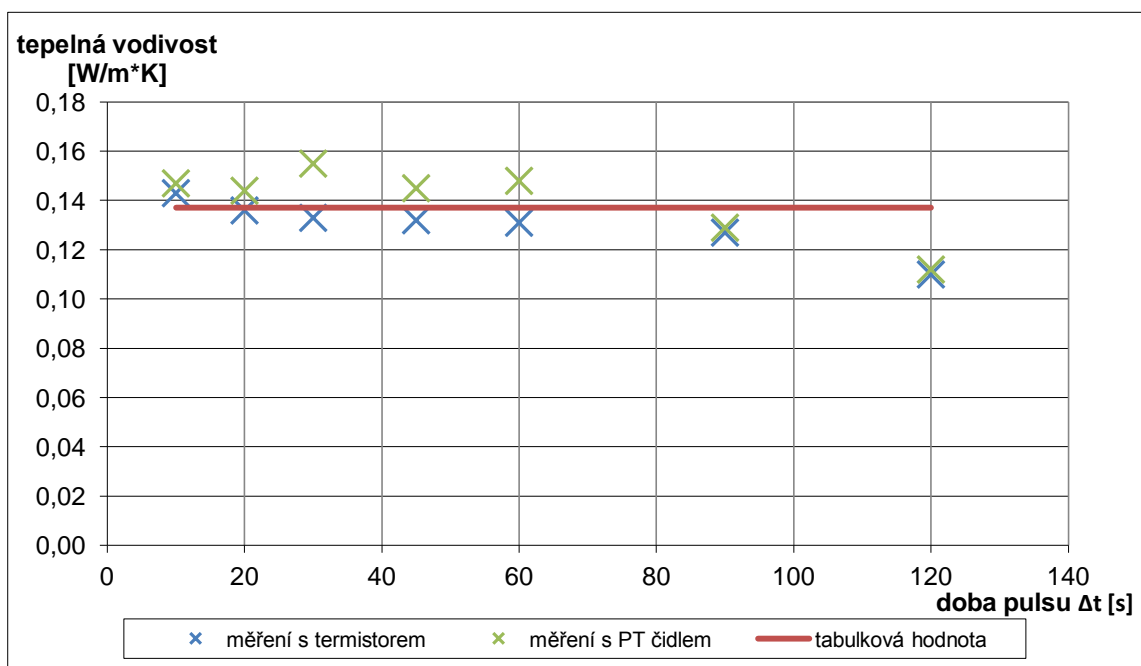
Nyní v jednom grafu porovnáme skupiny obou měření, pomůže nám to totiž odhalit, zda je to náhodná, nebo systematická chyba.

**Graf č. 19: Pórobeton Ytong,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $r = 1,3 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 10 \text{ až } 120 \text{ s}$  – doba teplotního maxima**



Z tohoto grafu vidíme, že se nejednalo o chybu jednoho měření, ale doba maxima s PT čidlem je v každém případě kratší. Může to být způsobeno špatně změřenou vzdáleností čidla od zdroje, nebo tím, že delší časová konstanta termistoru ovlivňuje měřenou charakteristiku takto výrazným podílem.

**Graf č. 20: Pórobeton Ytong,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $r = 1,3 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 10 \text{ až } 120 \text{ s}$  – tepelná vodivost**



Vyšší vypočítané hodnoty tepelné vodivosti pramení z dob dřívějšího maxima. Hodnotu pro 30 s puls s PT čidlem můžeme vzhledem k ostatním považovat za chybu tohoto měření. Kromě této a poslední hodnoty se všechny opět příliš neliší od tabulkové hodnoty (méně než o 10%), tentokrát jsou ale vyšší.

Systematicky zde však u obou skupin měření vidíme, že u posledních dvou hodnot je znatelný pokles teplotní vodivosti. Jelikož se tento pokles projevuje opakovaně u měření s oběma čidly, jedná se zřejmě o chybu této metody pramenící z nevhodné korekce na dobu trvání pulsu, které se budu věnovat v jedné z následujících kapitol.

### 7.3 Měření s termokamerou

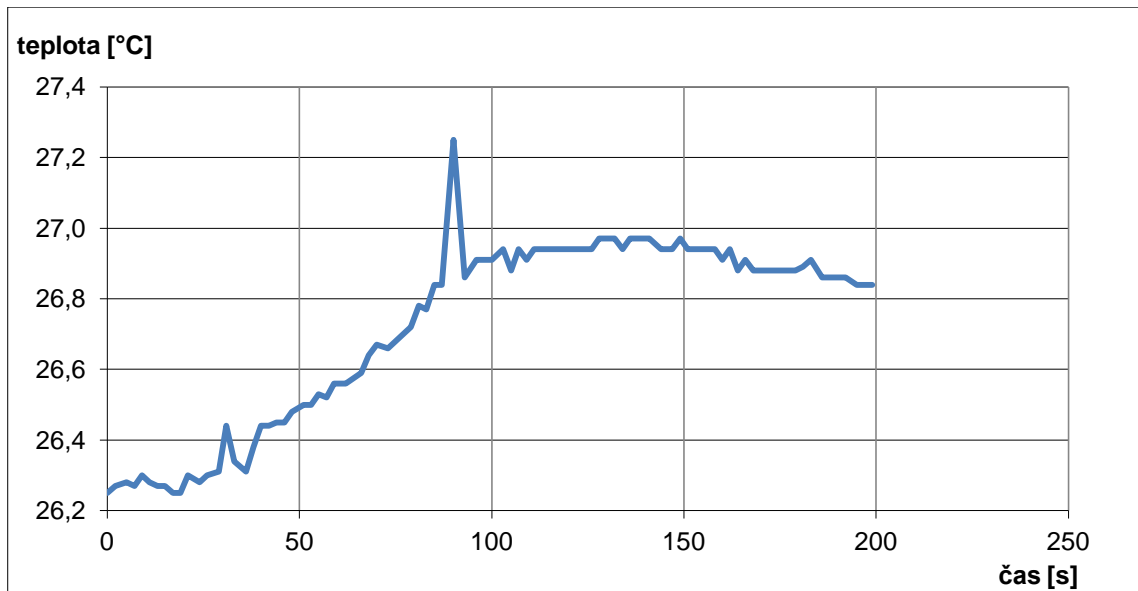
Na závěr byl experiment s bodovým zdrojem proveden formou bezkontaktního měření, které má své výhody i nevýhody. Mezi jeho přední výhody lze zařadit, že můžeme měřit teplotu v několika místech zároveň a také to, že měříme skutečnou teplotu na povrchu, nikoliv kontaktním čidlem, které má časovou konstantu a musíme zajistit spolehlivý kontakt. Mezi nevýhody však patří, že musíme mít správně nastavené podmínky měření (okolní teplota, emisivita) a nemůžeme přípravek přikrýt tepelnou izolací chránící před okolními vlivy.

Cílem tohoto měření nebylo dosažení co nejpřesnějších výsledků, ale zjistit, zda se teplo v okolí zdroje šíří dostatečně symetricky a můžeme tento průběh porovnávat se simulací s ideálním bodovým zdrojem. Z tohoto důvodu jsem nezjišťoval přesnou emisivitu pórobetonu a také jsem neumisťoval vzorek do uzavřeného prostoru, který by eliminoval dopadající záření a proudící vzduch.

Pro měření byl použit stejný výkon jako u předešlých měření, délka pulsu byla 30 s, bod pro sledování teploty byl namířen do místa vzdáleného 1,5 cm od středu zdroje a emisivita byla nastavena na hodnotu 0,95. Na termokameře byl nastaven režim snímkování s periodou 2 s, tu ale termokamera z neznámých důvodů občas nesplňovala a byla delší. Proto bylo nutné manuálně přepsat dobu pořízení každého snímku, abychom získali časový průběh.



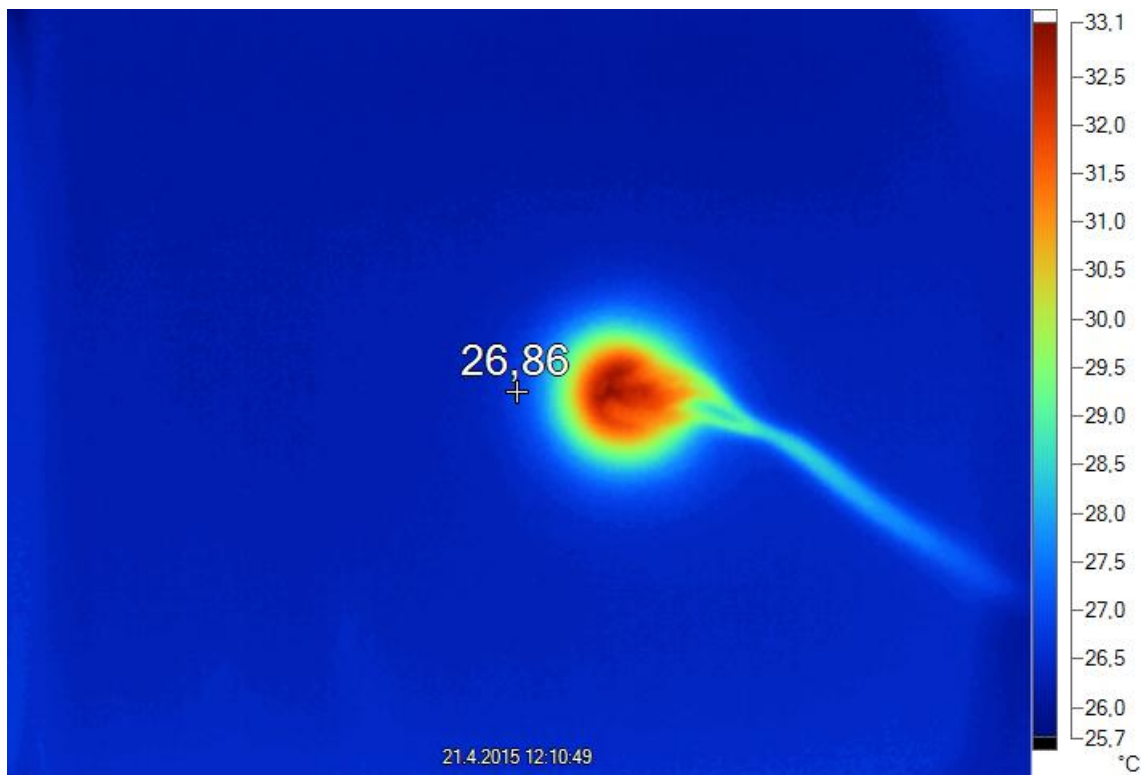
**Graf č. 21: Pórobeton Ytong, termokamera,  $U_z = 11 \text{ V}$ ,  $r = 1,5 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 30 \text{ s}$**



Z grafu vidíme, že teplotní vlna má podobný průběh jako u kontaktního měření, pouze několik hodnot vybočuje, zřejmě vinou pohybu osob v místnosti. Velkou nevýhodou je, že rozlišovací schopnost termokamery při tomto snímkování je 0,02 až 0,03 °C, a proto jsou občas znatelné skoky a tento způsob měření je spíše orientační. Pokud bychom ale chtěli i v tomto měření vypočítat tepelnou vodivost jako při kontaktním způsobu měření, museli bychom zanedbat špičku s nejvyšší hodnotou a čas dosažení maxima si vybrat z několika hodnot. Já jsem určil dobu dosažení maxima  $t_m = 134 \text{ s}$  a tomu odpovídá tepelná vodivost  $\lambda = 0,140 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Je to hodnota blízká tabulkové hodnotě, ale je nutné říct, že s velkou nejistotou kvůli intervalu hodnot se stejnou maximální teplotou. U jiného měření se stejnými podmínkami byla zjištěná tepelná vodivost  $\lambda = 0,156 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , což je z hlediska opakovatelnosti nepříjemný fakt a potvrzuje to tvrzení o poměrně velké nejistotě měření.

V elektronické příloze je přiložena animace tohoto měření, zde si ilustračně ukážeme pouze jeden snímek.

**Obrázek č. 10: Snímek z měření termokamerou**



Tento snímek je pořízen přibližně po 90 s měření, tedy 60 s po vypnutí zdroje. Je viditelné, že teplo se v levé části snímku od zdroje šíří symetricky. Na pravé straně od něj je tato symetrie porušena přítomností přívodních vodičů, které se také zahřívají. Proto argument o odvodu tepla přívodními vodiči je oprávněný. Právě kvůli jejich umístění na pravé straně vzorku byl bod pro sledování umístěn do opačné poloviny.

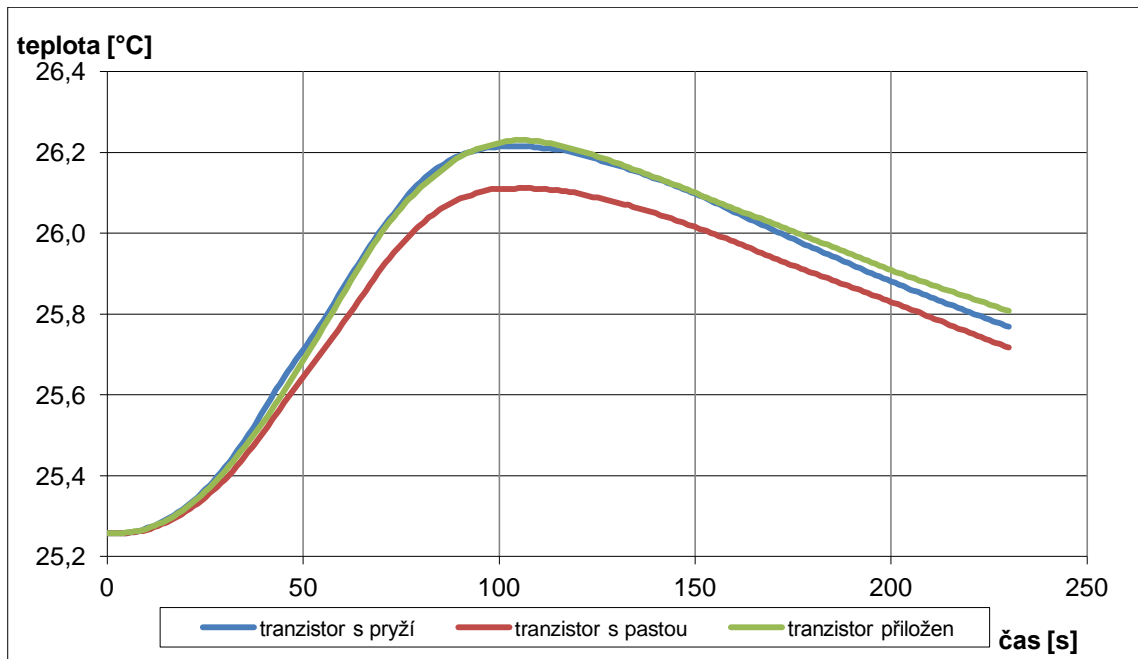
Možným rozšířením by bylo sledování teploty ve více bodech - bylo by možné provést experiment jen jednou, ale výpočet provést pro různé vzdálenosti, nebo ve stejné vzdálenosti a vycházet z aritmetického průměru. Vyplatilo by se to ale pro body blíže zdroje, kde je vyšší amplituda tepelného pulsu a nenarážíme na rozlišovací schopnost. Jelikož je ale měření bráno jako orientační a pro laboratorní úlohu bude použito kontaktní čidlo, dále jsem se této metodě nevěnoval.

#### **7.4 Vliv přichycení zdroje u kontaktního měření**

U měřicího přístroje, který by používal bodový zdroj tepla, je potřeba zajistit dobrý kontakt zdroje a čidla s měřeným objektem. Připravil jsem si nový zdroj tepla, který jsem tentokrát nebyl přichycen do vyvrtné díry uvnitř materiálu, ale pouze jsem jej přikládal na povrch. Opět se jednalo o stejný tranzistor s podobně zapojenými rezistory, ale nižším napětím zdroje byl snížen jeho výkon, aby nedocházelo k přehřívání v případě špatného kontaktu. Do vybrané vzdálenosti jsem umístil PT čidlo, které jsem jako v předchozích měřeních přichytil pomocí malého množství teplovodivé pasty.

Porovnával jsem rozdíl mezi tím, kdy je mezi zdroj a povrch nanášeno malé množství pasty, nebo zda je mezi ně vložena tenká vrstva pryže, popřípadě je zdroj přiložen na povrch bez jakékoliv mezivrstvy.

**Graf č. 22: Pórobeton Ytong, PT čidlo,  $U_z = 7,5 \text{ V}$ ,  $r = 1,09 \text{ cm}$ ,  $\Delta t = 60 \text{ s}$**



Podmínky měření: izolace na PT čidle a kolem zdroje, přípravek zakryt krabicí

Naměřené křivky jsem upravil tak, aby měly stejnou počáteční teplotu, lépe tak vyniknou rozdíly. Je naprosto minimální rozdíl, zda byl tranzistor k povrchu pouze přiložen, nebo zda byla přítomna i vrstva pryže. Dokonce naměřené křivky dosáhly časového maxima ve stejný čas, takže výsledky tepelné vodivosti jsou shodné. Pokud byla nanášena teplovodivá pasta mezi tranzistor a povrch vzorku, byla naměřena nižší amplituda tepelného pulsu a křivka dosáhla časového maxima později. Je možné, že se nepodařilo umístit zdroj stejně daleko od čidla jako v ostatních případech, což by vysvětlovalo jak nižší amplitudu, tak i pozdější dobu dosažení maxima.

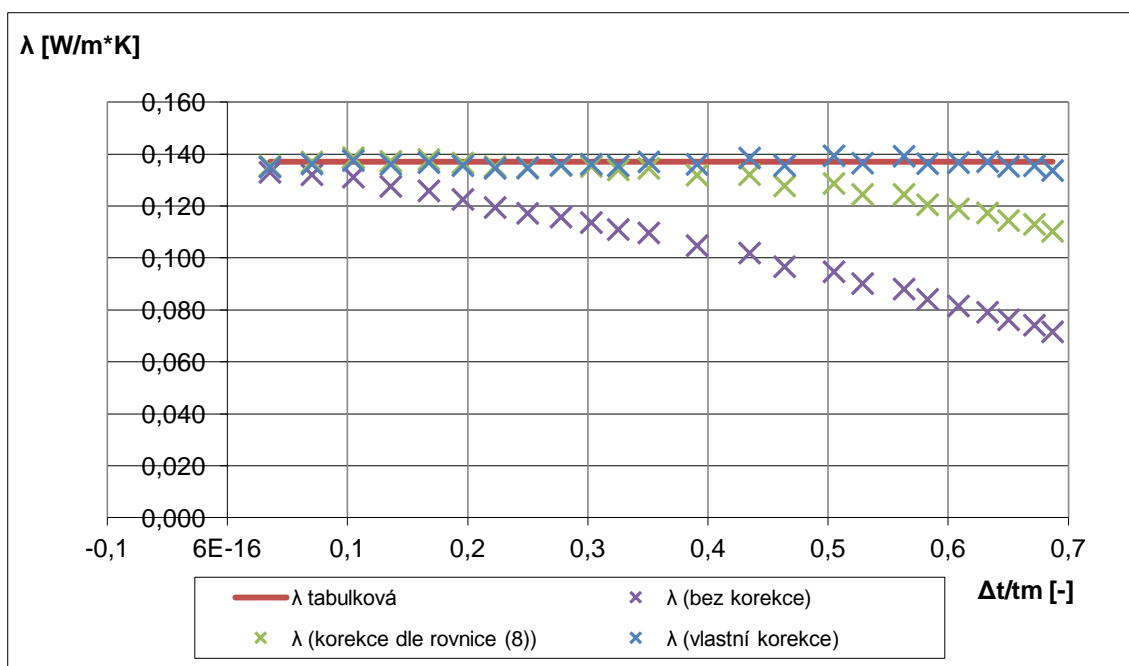
Hlavním závěrem tohoto krátkého experimentu však je, že žádná zkoumaná mezivrstva nepřinesla lepší výsledky. Je to pozitivní výsledek, protože teplovodivá pasta by zašpinila měřený vzorek, což by při měření v interiéru budov zajisté vadilo. Zároveň ale nesmíme vyloučit, že se může podařit najít materiál, se kterým bude naměřena vyšší amplituda než v mých experimentech.

## 8 Návrh vlastní korekce na dobu pulsu

Jak bylo zmíněno v kapitole 7.2, u dlouhých pulsů byla zaznamenána nižší tepelná vodivost než u pulsů krátkých. Jelikož byl tento pokles zaznamenán u obou teplotních čidel, začal jsem se zajímat o vliv teplotní korekce.

Provedl jsem sérii simulací v COMSOLu, který respektuje délku dobu působení zdroje a podobně jako při měření jsem ze simulované křivky určit dobu dosažení teplotního maxima a tepelnou vodivost dle ní odpovídající. Tu jsem ale nevynesl do grafu v závislosti na absolutní hodnotě doby trvání pulsu, ale na relativní hodnotě podílu doby pulsu a doby dosažení teplotního maxima, aby byl graf obecný.

**Graf č. 23: Porovnání tepelné vodivosti dle výsledků simulace délky pulsu**



Z grafu je patrné, že si nemůžeme dovolit zanedbat vliv doby pulsu ve výpočtu tepelné vodivosti. Snad pouze při velmi krátkých pulsech, ale ty jsou takřka ve všech případech vyloučeny kvůli přenosu malého množství tepla a tedy nižší odolnosti vůči rušení. Pro korekci, která je zahrnuta v rovnici (8), platí, že pro hodnoty podílu  $\Delta t/t_m$  menší než 0,5 je odchylka vypočítané tepelné vodivosti do 10%. Pokud se ale dostaneme do situace, kdy je výhodné nebo nutné použít delší puls, tak tato odchylka stále roste. Dle výsledků simulace jsem tedy navrhl vlastní korekci, která v rovnici (8) nahradila koeficienty jinými a rozšířila tuto řadu o další člen.

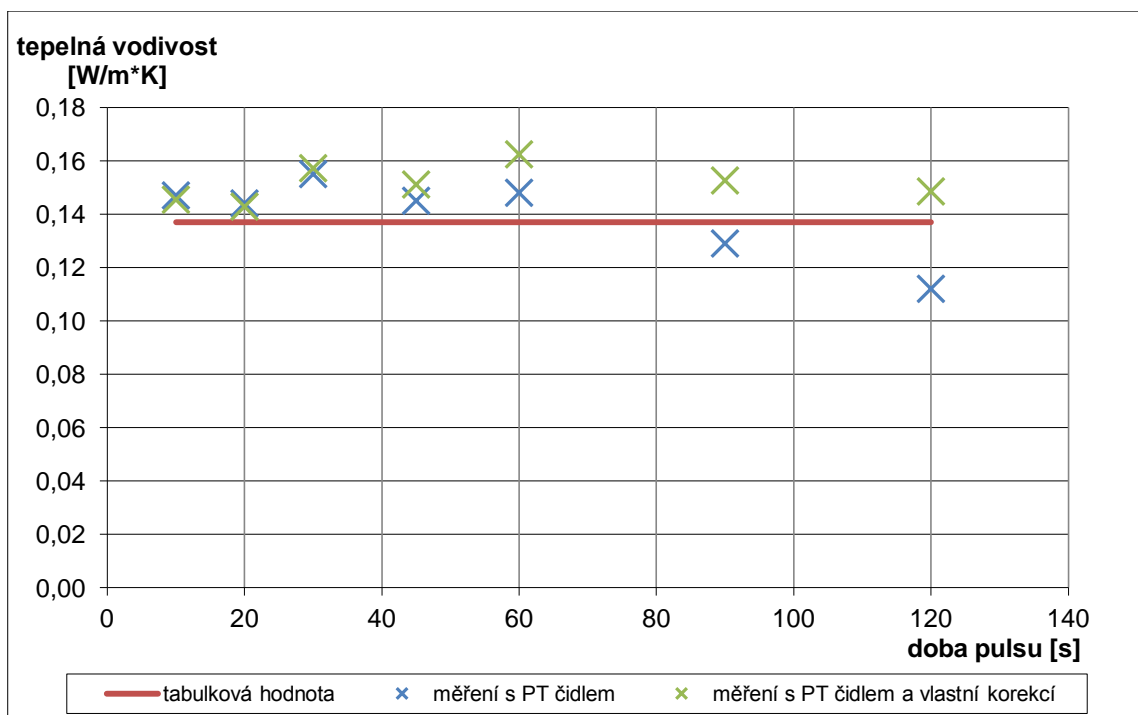
$$\lambda = \frac{\rho c r^2}{4\Delta t} \left[ \frac{\Delta t}{t_m} + 0,4 \left( \frac{\Delta t}{t_m} \right)^2 + 0,5 \left( \frac{\Delta t}{t_m} \right)^3 + 1,1 \left( \frac{\Delta t}{t_m} \right)^4 \right]. \quad (11)$$

Po aplikování této korekce už výsledky téměř odpovídají hodnotě nastavené v simulaci, tedy tabulkové hodnotě, drobné odchylky jsou způsobeny diskrétním krokem simulace 1 s a tím způsobenou nižší rozlišovací schopností. Přesnější korekci

by byla řada s vyšším počtem členů, ale s ohledem na přesnost je pro podíl  $\Delta t/t_m$  nižší než 0,7 tento rozvoj plně dostačující. Ideálním případem je analytické řešení podpořené výsledky simulace, nikoliv z ní vycházející. Bylo proto prostudováno několik materiálů<sup>[10],[11]</sup>, kde je studován vliv doby pulsu při měření tepelné vodivosti. V těchto materiálech je však tepelná vodivost měřena jinou metodou a není zde uveden podobný rozvoj do řady.

Pokud tuto novou korekci promítneme do dřívějších měření, je znatelné zlepšení pro delší pulsy a výsledky tepelné vodivosti jsou konzistentnější. Ačkoliv tedy korekce nevychází z analytického řešení, výsledky simulace jsou pro tvorbu vlastní korekce dostačující a její cíl byl splněn.

**Graf č. 24: Srovnání korekcí na dobu trvání pulsu**



## 9 Odhad nejistot měření a porovnání metod měření tepelné vodivosti

V poslední části se pokusím shrnout různé faktory ovlivňující kvalitu měření tepelné vodivosti nestacionární metodou, zaměřím se na měření s bodovým zdrojem, u kterého se podařilo docílit přesnějších výsledků a bude možné jeho využití v laboratorních cvičeních. Pokusím se o nejen nastínění těch faktorů, které ovlivňují naměřená data, nebo i dalších, které mají dopad na získané výsledky (rovnice výpočtu tepelné vodivosti, porovnávání s údaji výrobců), ale i zajištění jejich co nejvyšší eliminace.

### 9.1 Rušení

Do první skupiny, tedy činitelů, které mají vliv na přesnost výsledků, je již několikrát zmíněné rušení z okolí. Jedná se jak tepelné vyzařování objektů (například lidského těla – po přiblížení holé ruky k čidlu je zaznamenána změna odporu, která může být větší než v průběhu celého měření), tak i proudění vzduchu, které způsobuje kolísání odporu měřicího čidla. Těmto nepříjemným zdrojům chyb se dá zabránit zaizolováním od okolí, při mých měřeních se osvědčila vrstva minerální vaty na čidle kompletně zakrývající jeho vývody. Proti proudění je vhodné umístit měřený vzorek do uzavřeného prostoru. Odvodu tepla do okolí, kterému se nedá zabránit, je odvod tepla přívodními kabely napájející odporový drát.

### 9.2 Přesnost měřených veličin

Svou roli hrají také nejistoty jednotlivých měřicích přístrojů. Nejistota odporu měřeného multimetrem je zanedbatelná, protože do počítače je zaznamenáváno 6 či 7 platných číslic (rozlišení  $6\frac{1}{2}$  digit). Také by bylo kontraproduktivní každé hodnotě odporu přiřazovat možnou nejistotu a určovat, kde se nejpravděpodobněji nachází teplotní maximum. Můžeme tvrdit, že nevyšší hodnotě náleží největší nejistota, tedy je nejpravděpodobnější, že i při zahrnutí nejistot bude stále nejvyšší.

Veličina, u které není lehké určit její přesnou hodnotu je výkon bodového zdroje. Její velikost jsem určoval ze znalosti kolektorového proudu  $I_C$  a napětí  $U_{CE}$ . Zanedbal jsem však básový proud  $I_B$ , který také způsobuje drobné tepelné účinky. Kvůli zahřívání zapojených odporů se i tyto veličiny v průběhu mění, konkrétně se výkon během měření postupně snižoval z 0,77 W na 0,75 W. Výhodou této metody měření však je, že nezáleží na přesné výšce teplotního pulsu, ale poskytuje nám zpětnou vazbu. Například díky měření výkonu se podařilo u liniového zdroje určit špatně změřenou charakteristiku termistoru.

Další vstupní veličinou je čas, po který byl zdroj zapnut. Jednak je vstupem simulace, kde ovlivňuje výšku teplotní vlny (která však není stěžejní), ale ovlivňuje výpočet tepelné vodivosti. Bohužel tato chyba je na straně experimentátora a lze ji těžko vyčíslit, záleží také na době pulsu.

Příkladově si můžeme uvést, že pro měření má být použit puls o délce 41 s. Experimentátor ale nechá zdroj zapnutý o 10% déle, tedy 45 s. Ve výsledku naměří odlišnou teplotní charakteristiku s pozdějším dosažením maxima  $t_m$  a výsledná tepelná vodivost bude o 2% nižší. Pro kratší pulsy je tato chyba nižší, pro delší pulsy roste. Možným způsobem pro eliminaci této chyby je odstranění lidského faktoru a propojení měřicího softwaru s ovládáním programovatelného zdroje. Obsluha by pouze nastavila, po jakou dobu má být zdroj zapnutý a tato chyba by byla eliminována.

Časová veličina nevstupuje do výpočtu pouze v jako doba pulsu, ale také jako doba dosažení maxima, která nese jistou nepřesnost v době vzorkování. Pro dobu maxima 100 s to představuje chybu výsledku tepelné vodivosti kolem 1%, proto tento parametr pro naše měření není kritický. Pro měření jiných materiálů, kde by byl tento čas kratší, je vhodné zkrátit periodu vzorkování.

Z hlediska výpočtu tepelné vodivosti je nejkritičtějším parametrem vzdálenost čidla od zdroje. Je to patrné i podle toho, že se v rovnici nachází v druhé mocnině.

Opět si vzorově ukážeme, jak se nepřesnost této veličiny projeví ve výsledku tepelné vodivosti. Měříme tepelnou vodivost ve vzdálenosti 1,3 cm zdroje. Experimentátor špatně změří tuto vzdálenost, bude se domnívat, že má čidlo umístěné o 10% dále, tedy ve vzdálenosti 1,43 cm. Pokud tento špatný údaj dosadí do výpočtu tepelné vodivosti, toto 10% navýšení vzdálenosti je projeví přibližně 21% nárůstem hodnoty tepelné vodivosti.

### 9.3 Získání naměřené teploty

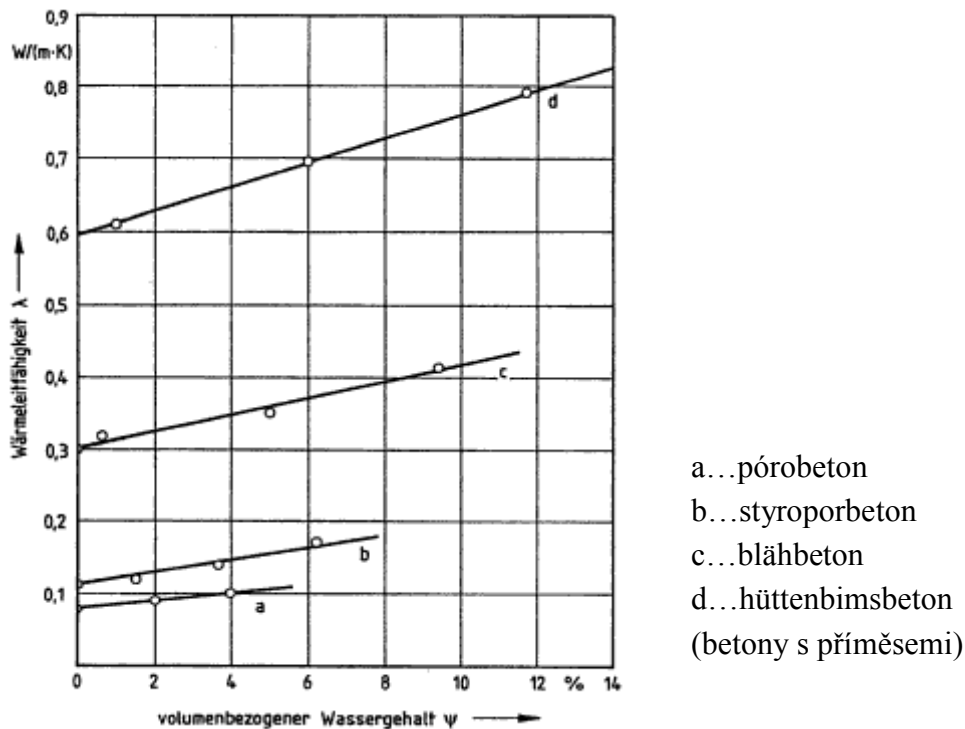
Dalším zdrojem nejistot je teplotní rovnice čidla, pomocí které získáváme absolutní teplotu přípravku. Naštěstí je šíření teplotní vlny relativní vůči počáteční teplotě, proto tato převodní charakteristika neovlivní výsledek tepelné vodivosti. I když má PT čidlo nižší citlivost než termistor, tak je stále dostatečná při určování teplotní vodivosti. Jeho menší rozměry zajišťující přesnější určení místa kontaktu společně s řádově nižší časovou konstantou jsou důvody, proč se spíše přiklánět k výsledkům získaným pomocí něj.

### 9.4 Referenční hodnota tepelné vodivosti

Dalším zdrojem nejistot je samostatná referenční hodnota tepelné vodivosti udávaná výrobcem, se kterou výsledky srovnáváme. Většina výrobců tento parametr uvádí jako  $\lambda_{10dry}$ , což značí tepelnou vodivost ve vysoušeném stavu.

Ve článku zabývajícím se vlivem vodních par na tepelnou vodivost<sup>[12]</sup> se můžeme dozvědět, že s rostoucí vlhkostí roste také i tepelná vodivost. Potvrzuje to i jiný zdroj<sup>[13]</sup>, kde jsou jednotlivé závislosti tepelné vodivosti na vlhkosti vyneseny v grafu.

Obrázek č. 11: Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu<sup>[13]</sup>



Je ale těžké posoudit, jaká je aktuální vlhkost materiálu, protože ta v žádném případě není shodná s vlhkostí vzdušnou. Výsledky jedné studie<sup>[14]</sup> prezentují, že při běžných podmínkách (vzdušná vlhkost kolem 50%) by měla být vlhkost pórabetonu kolem 2%. Obě informace však nepochází ze stejného zdroje, nemusí se týkat stejného materiálu a bylo by nevhodné vyvozovat jasný závěr.

Tato krátká podkapitola není primárně věnována korekci výsledků na tepelnou vodivost, jelikož se naměřené výsledky dostatečně shodují se simulacemi. Při jiných měřeních tomu však tak být nemusí a bylo by chybné tento faktor opomenout. Může ale posloužit jako podnět pro hlubší studium této problematiky pro zlepšení použité metody.

## 9.5 Rovnice výpočtu tepelné vodivosti

Určitým nepřímým zdrojem chyb, na který se můžeme zaměřit, je rovnice (8), pomocí které je vypočítána tepelná vodivost. Tato rovnice má svoje klady i zápory spočívající v tom, že vycházíme pouze z hodnoty času dosažení teplotního maxima.

Místo výpočtu z jedné hodnoty teplotního maxima by se mohlo jevit výhodnější aproximování křivky a porovnávání se simulací. Nedostatkem této myšlenky však je, že analytická rovnice nerespektuje délku teplotního pulsu a simulace metodou konečných prvků je časově příliš náročná.

Výhodou této metody však je, že je imunní vůči převodní charakteristice teplotního senzoru a dost jisté míry také k množství vyzářené energie nebo odvedené přírodními



vodiči. Jiné metody však dbají na přesnost změřené charakteristiky a právě proto byla vybrána tato metoda.

Měřením delších časových pulsů byl zjištěn nedostatek v korekci na dobu zapnutí zdroje a byl proveden vlastní návrh, který jej již dokázal odstranit.

## 9.6 Jiné metody výpočtu tepelné vodivosti

Kromě používané metody měření tepelné vodivosti se můžeme zaměřit na jiné způsoby jejího určení, zda nezajistí přesnější výsledky, nebo nepřináší výhody v jiných attributech.

Jedna z dalších metod uvedená v hlavním literárním prameni<sup>[2]</sup> vychází ze znalosti výkonu zdroje, doby dosažení teplotního maxima a hodnoty této teploty (hodnota je vztažena vůči počáteční teplotě). Výhodou je, že měříme přímo tepelnou vodivost a nemusíme teplotní vodivost přepočítávat přes hodnoty měrné tepelné kapacity a hustoty. Její nevýhodou však je, že musíme znát přesný výkon zdroje, přesnou převodní charakteristiku teplotního čidla a nejlépe vědět, kolik tepla bylo odvedeno různými způsoby do okolí, protože maximální hodnota teploty je vlivem záření a odvodu tepla přírodními vodiči snížena.

Ve stejném literárním prameni je také zmíněna vícebodová metoda měření tepelné vodivosti, kdy jsou čidla umístěna v různých vzdálenostech od zdroje. Postačujícími vstupními hodnotami jsou velikosti teplot v daných bodech a čas, ve kterém byly teploty naměřeny. Tato metoda by tedy nepotřebovala znát výkon zdroje, dobu dosažení teplotního maxima, měrnou tepelnou kapacitu a ani hustotu. Opět se však nevyhýbáme nutnosti znát přesnou převodní charakteristiku čidla teploty a odvodu tepla. Vinou možného nepochopení vztahu výpočtu nebo chyby v materiálech se však nepodařilo dospět k výsledkům alespoň řádově srovnatelnými s hodnotami tabulkovými. Je také otázkou, jak by výsledky byly spolehlivé, protože zde vystupují vzdálenosti dvou čidel od zdroje a jak bylo ukázáno, vzdálenost čidla od zdroje byla při měřeních hlavním zdrojem chyb.

V normě ASTM D5930<sup>[15]</sup> se tepelná vodivost určuje pomocí vstupujícího výkonu a směrnice růstu teploty po zapnutí zdroje. Tímto je výpočet opět zbaven závislosti na hustotě  $\rho$  a měrné tepelné kapacitě  $c$ . V normě je metoda sice zmíněna v kontextu s plastovými materiály, ale je schopná měřit hodnoty tepelné vodivosti v rozsahu, ve kterém se pohybují materiály vytvořených přípravků. Nevýhodou této metody je, že musí být opět přesně známá rovnice teplotního čidla a odvod tepla.

Závěrem tedy zůstává, že jiné metody měření tepelné vodivosti vychází ze znalosti přesné teploty v místě měření, což je vzhledem k některým dějům složité zaručit. Zvolená metoda je vůči tomuto imunní a podařilo se jí dospět k přesnějším výsledkům.

## 10 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit měřicí přípravek a na něm ověřit metodu měření tepelné vodivosti pomocí liniového a bodového zdroje a přípravek připravit pro měření ve školních laboratořích. Byly zhotoveny přípravky z vápenopískové, pálené cihly a pórobetonu s připevněnými liniovými zdroji tepla a přípravek s pórobetonu s bodovým zdrojem tepla, který se díky nejpřesnějším výsledkům hodí pro použití v laboratorních cvičeních.

V této práci byla uvedena měření nejvíce demonstrující zaznamenanou problematiku a ta, která dospěla k nejpřesnějším výsledkům, včetně jejich porovnání se simulacemi. Zároveň je vidět i postupná tendence zpřesňování naměřených dat spočívající v nalézání a odstraňování negativních vlivů. U jednotlivých měření je vždy krátký popis, k jakým výsledkům se dospělo a jaké jsou v porovnání s ostatními měřeními včetně všech nesnází, která je doprovázela.

Měření s bodovým zdrojem dospěla k mnohem přesnějším výsledkům a důvod tohoto rozdílu zůstal i přes rozsáhlá zjišťování nevysvětlen. Přípravek s pálenou cihlou byl předělán do formy co nejpodobnější s přípravkem v laboratořích FAST, ale ani to nepomohlo k lepším výsledkům. Nejpravděpodobnější vysvětlení se nabízí, že vzorek z pálené cihly byl vytvořen z jiného materiálu a u vápenopískové cihly a pórobetonu byl zvolen nevhodný způsob uchycení zdroje, popřípadě tato metoda má své nedostatky, na které se nepodařilo přijít.

Vzorek z pórobetonu s bodovým zdrojem byl upraven pro snadnější použití v laboratorních cvičeních a to tak, že k němu byly připevněny banánkové konektory a čidlo bylo připevněno do jedné vzdálenosti, aby byl omezen vliv nesprávné manipulace. V elektronické příloze se nachází vzorový protokol laboratorních cvičení včetně postupu upraveného pro zhotovený přípravek a to v rozsahu čtyř měření, které bude naplní dvou dvouhodinových cvičení dostatečných pro změření potřebných údajů. Studenti z naměřených charakteristik určí tepelnou vodivost bez korekce na dobu trvání pulsu a po započítání této korekce a zhodnotí její vliv. Požití přípravku s liniovým zdrojem by bylo po krátkých úpravách také možné, vzhledem k dosaženým výsledkům to není vhodné, proto k těmto úpravám nedošlo.

Na závěr této práce jsou porovnány různé metody výpočtu tepelné vodivosti včetně jejich kladů i záporů. Byly zde také zhodnoceny některé faktory ovlivňující přesnost výpočtu měření tepelné vodivosti vybranou metodou a zdůrazněny ty, které mají největší vliv. Také byla navržena vlastní korekce, která pro delší časové pulsy poskytuje přesnější výsledky než korekce z prostudovaných literárních pramenů.

# 11 Literatura

- [1] FICKER, Tomáš a Luboš PAZDERA. Nestacionární měření tepelné vodivosti pevných látek (laboratorní úloha pro fyzikální praktikum). *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků, 1998, roč. 43, č. 4, s. 308-313.
- [2] KREMPASKÝ, Július. *Meranie termofyzikálnych veličín*. 1. vyd. Bratislava: SAV, 1969, 287 s. ISBN -.
- [3] CARSLAW, H. S. a J. C. JAEGER. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959, 510 s. ISBN -.
- [4] HERR, T. *Měření tepelné vodivosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 62 s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Petr Beneš, Ph. D..
- [5] *Technická příručka ZDICÍ SYSTÉM SENDWIX*. Hodonín, rok neznámý. Dostupné z: <http://www.stavomarket.cz/underwood/download/files/technicky-list-vpc.pdf>
- [6] StavMaChem ® | AKCE BRNO | Cihla plná P20 29x14x6,5 cm pal=321ks MALENOVICE. *StavMaChem ® | KVALITNÍ STAVEBNÍ MATERIÁLY BRNO | ZEMNÍ VRUTY | O FIRMĚ* [online]. 2014 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: [http://www.stavmachedem.cz/index.php?menu=13&menu\\_eshop=117&idproduktuetail=1011](http://www.stavmachedem.cz/index.php?menu=13&menu_eshop=117&idproduktuetail=1011)
- [7] ROCHLA, M. *Stavební tabulky*. Praha: SNTL, 1987, 831 s. ISBN -.
- [8] Přesné tvárnice pro obezdívky - Ytong. *Stavební materiál pro stavbu i rekonstrukce | Ytong.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.ytong.cz/cs/content/presne-tvarnice-pro-obezdivky.php>
- [9] *Platinum Resistance Temperature Detector Heraeus M222*. Kleinostheim, Germany, 2011. Dostupné také z: [http://heraeus-sensor-technology.de/media/webmedia\\_local/media/pdfsen/m\\_222\\_e.pdf?\\_utma=179074621.1958665454.1431956171.1431956171.1431956171.1&\\_utmb=179074621.11.6.1431956198521&\\_utmc=179074621&\\_utmz=179074621.1431956171.1.1.utmcsr=google|utmccn=%28organic%29|utmcmd=organic|utmctr=%28not%20provided%29&\\_utmv=-&\\_utmh=213293780](http://heraeus-sensor-technology.de/media/webmedia_local/media/pdfsen/m_222_e.pdf?_utma=179074621.1958665454.1431956171.1431956171.1431956171.1&_utmb=179074621.11.6.1431956198521&_utmc=179074621&_utmz=179074621.1431956171.1.1.utmcsr=google|utmccn=%28organic%29|utmcmd=organic|utmctr=%28not%20provided%29&_utmv=-&_utmh=213293780)
- [10] HECKMAN, R. C. Finite pulse-time and heat-loss effects in pulse thermal diffusivity measurements. *Journal of Applied Physics*. United States of America: American Institute of Physics, 1973, **44**(4): 1455-1460. ISSN 0021-8979.
- [11] LARSON, K. B. a Karl KOYAMA. Correction for Finite-Pulse-Time Effects in Very Thin Samples using the Flash Method of Measuring Thermal Diffusivity. *Journal of Applied Physics*. United States of America: American Institute of Physics, 1967, **38**(2): 465-474. ISSN 0021-8979.

- [12] FUCIMAN, O.; ŠKRAMLÍK, J. Vliv kondenzace vodních par na změny tepelné vodivosti stavebních hmot. *Stavební obzor*, 2009, roč. 18, č. 1. 2009, s. 14-17. ISSN: 1210- 4027.
- [13] FREYMUTH, Hanns, Richard JENISCH, Heinz KLOPFER, Karl PETZOLD, Martin STOHRER, Heinz-Martin FISCHER a RICHTER. *Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. 5., überarb. Aufl. Stuttgart: Teubner, 2002, xxi, 731 s. ISBN 35-194-5014-3.
- [14] DROCHYTKA, Rostislav, Jiří ZACH a Jitka HROUDOVÁ. Studium chování pórobetonu po zabudování do konstrukce z tepelně-vlhkostního hlediska. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/7985-studium-chovani-porobetonu-po-zabudovani-do-konstrukce-z-tepelne-vlhkostniho-hlediska>
- [15] ASTM D5930-09. Thermal Conductivity of Plastics by Means of a TransientLine-Source Technique. 2009.

## 12 Seznam symbolů a příloh

### 12.1 Seznam symbolů

$\lambda$	tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$T$	teplota (K)
$T_0$	počáteční (okolní) teplota (K)
$\mathbf{q}$	vektor hustoty tepelného toku ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$c$	měrná tepelná kapacita ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$\rho$	hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$t$	čas (s)
$t_m$	doba dosažení teplotního maxima (s)
$\Delta t$	doba pulsu (s)
$q_0$	výkon (W)
$Q_{\text{lin}}$	teplo vyslané z jednoty délky liniového zdroje ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$Q_{\text{bod}}$	teplo vyslané z bodového zdroje (J)
$r$	vzdálenost čidla od zdroje (m) (vždy měřena od střed zdroje ke středu čidla)
$b$	délka liniového zdroje (m)
$s$	tloušťka vzorku (m)

### 12.2 Seznam příloh

CD s následujícími soubory:

Kompletní text bakalářské práce ve formátu .pdf

Vzorový protokol laboratorní úlohy měření tepelné vodivosti ve formátu .pdf

Program pro záznam dat z multimetru Agilent 34410A vytvořený ve vývojovém prostředí LabVIEW

Zdrojové soubory simulací pro bodový i liniový zdroj v programech MATLAB a COMSOL

Animace výsledků měření termokamerou ve formátu .gif