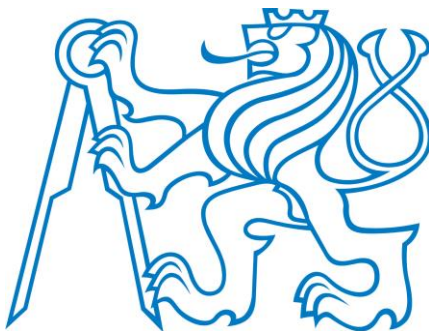


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pracoviště dynamické aktivní

termografie

Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Pracoviště: Ústav přístrojové a řídicí techniky

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

jméno:

Ruslan Allakhverdiev

obor: Informační a automatizační technika

Název tématu: **Pracoviště dynamické aktivní termografie**

Název anglicky: Dynamic Active Thermography Station

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principem dynamické aktivní termografie (DAT); prozkoumejte obvyklá řešení.
2. Navrhněte experiment pro detekci skrytých vad materiálu pomocí DAT. Při návrhu experimentu počítejte s jeho využitím ve výuce.
3. Prozkoumejte termografické pracoviště v laboratoři automatického řízení včetně technické dokumentace klíčových přístrojů (termokamera, stroboskop).
4. Navrhněte, zdůvodněte a proveďte změny hardwaru stávajícího pracoviště potřebné k realizaci experimentu.
5. Navrhněte a implementujte softwarové řešení pro ovládání tepelného zářiče (stroboskopu) a pro zachytávání a zpracování dat z termokamery. Volbu použitých softwarů zdůvodněte.

Rozsah grafických prací: max. 50 %

Rozsah práce: min. 30 stran + přílohy

Seznam odborné literatury:

- [1] V. Lysenko, Sensory neelektrických veličin 2. díl – Detektory pro bezdotykové měření teplot, BEN technická literatura, 2005 (NTK)
- [2] F. Helebrant, V. Moni, M. Hudeczek, P. Urban, Technická diagnostika a spolehlivost – V. Termografie, VŠB TU Ostrava 2008 (NTK)
- [3] User documentation Flir Ax5 series [CD]. Flir Systems, Inc., 12.3.2013.
- [4] User manual Superstrobe 2700 [online]. Ver. 3.5, Eurolite. [cit. 8.4.2016]
Dostupný na <http://media.steinigke.de/download_t/52202174-MANUAL-3.50-en-de_00076343.pdf>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Trnka

Datum zadání bakalářské práce: 12. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 6. 2016

J. Chyský

doc. Ing. Jan Chyský, CSc.
vedoucí ústavu

M. Valášek

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne: 5. 4. 2016



Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval(a) samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Datum: podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu moje práce Ing. Pavlu Trnkovi za podporu a rady během vypracování této práce. Taky bych chtěl poděkovat společnosti Workswell a Ing. Janu Sovovi za poskytnuté software. A nakonec chtěl bych poděkovat své rodině a hlavně svému otcevi, který mě zmotivoval k tomu, abych dokázal vypracovat tuto práci.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá metodami dynamické aktivní termografie a vybavením pracoviště, na kterém se provádí. Mezi tyto metody patří metoda pulzní termografie, metoda step heating a metoda lock-in termografie. Pro pracoviště bylo navrženo a implementované softwarové řešení, umožňující ovládat experiment přes jedno programové rozhraní.

Klíčová slova

Dynamická termografie, aktivní termografie, termokamera, step heating, SmartVision SDK

Abstract

The scope of this thesis are methods of dynamic active thermography and equipment of the workplace at which it is being conducted. These methods are: pulse thermography, step heating and lock-in thermography. A software solution was designed and implemented for the workplace, which allowed to conduct experiment through the single user interface.

Keywords

Dynamic thermography, active thermography, step heating, SmartVision SDK

1 Obsah

Úvod	9
2 Bezdotykové měření teploty	10
2.1 Teoretická podstata bezdotykového měření teploty	10
2.1.1 Tepelné záření	10
2.1.2 Absolutně černé těleso	12
2.1.3 Emisivita	12
2.1.4 Termokamery a pyrometry	14
2.1.5 Princip činnosti termokamer	15
2.1.6 Přehled parametrů termokamer	16
3 Termografie	17
3.1 Pasivní termografie	17
3.2 Aktivní termografie	18
3.2.1 Pulzní termografie	19
3.2.2 Lock-in termografie	21
4 Návrh experimentu	22
4.1 Přehled stávajícího stavu termografického pracoviště v laboratoři automatického řízení	22
4.1.1 Měřicí technika	22
4.1.2 Zdroj tepelného buzení	24
4.1.3 Výpočetní technika a software	25
4.1.4 Zkušební vzorek	26
4.2 Experiment	28
4.2.1 Uspořádání pracoviště	28
4.2.2 Postup při provedení experimentu	30
4.2.3 Výsledky experimentu a jejich vyhodnocení	30
5 Změny hardwaru a realizace softwarového řešení pro provedení experimentu	36
5.1 Navržené a provedené změny hardwaru termografického pracoviště	36
5.1.1 Zvolená řešení	36
5.2 Vývoj programu pro ovládání experimentu	38
5.2.1 Přehled možných řešení pro vývoj programu	38
5.2.2 Popis programu	39
6 Závěr	42

Seznam symbolů

Intenzita zářivého toku E [$W \cdot m^{-2}$]

Stefan-Boltzmanova konstanta $\sigma = 5,68 * 10^{-8} [W * m^{-2} * K^{-4}]$

Teplota T [K]

Dopravní zpoždění T_d [s]

Časová konstanta T_1 [s]

Úvod

I když infračervená termografie je poměrně mladou disciplínou, její historie se začala až v roce 1800, kdy William Hershel objevil existenci záření pod hranicí červeného světla. Toto záření se pojmenovalo infračervené a od této doby se začaly provádět první pokusy bezdotykového měření. V roce 1878 byl vytvořen první bolometr – senzor tepelného záření, pracující na principu termorezistoru. Tento senzor dokázal detekovat záření 400 metru vzdáleného zdroje tepla. Další vývoj termografie byl primárně spojen s vojenskými aplikacemi nočního vidění.

V současné době má infračervená termografie uplatnění v mnoha oblastech včetně stavebnictví, zdravotnictví, strojírenství a ostatních. Jednou se zajímavějších aplikací je možnost nedestruktivního testování materiálu, kterou se zabývá tato práce.

V prvních dvou kapitolách probíhá seznámení se základní principy, na kterých je založeno bezdotykové měření teploty a různými metodami provedení nedestruktivního testování pomocí termografie. Čtvrtá kapitola popisuje experiment, provedený na základě jedné z metod dynamické termografie. Konečně, pátá kapitola se zabývá modernizací softwarového a hardwarového vybavení termografického pracoviště, na němž byla provedena měření.

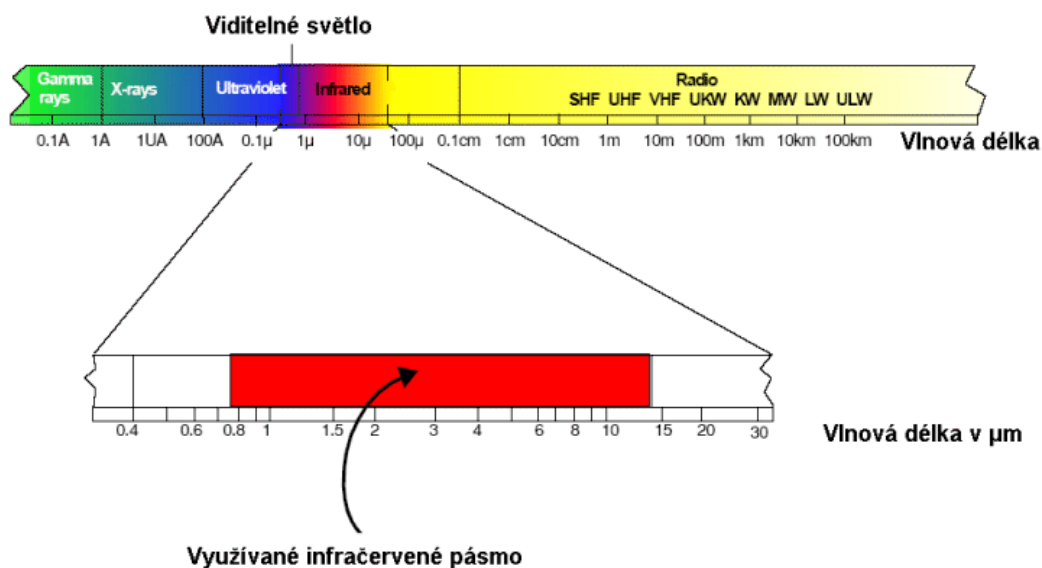
2 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teploty je jedním z modernějších způsobů měření teploty. Jeho hlavními výhodami jsou rychlost a přesnost, možnost zaznamenávání velmi rychlých změn teploty v širokých rozsazích a možnost snímání teploty po celém povrchu měřeného objektu. Pasivní a bezdotyková povaha tohoto typu zaručuje, že měřený objekt a jeho teplota nejsou ovlivněny měřicím přístrojem. Avšak pro správné provedení tohoto typu měření je nezbytné znát základní teoretické principy, na kterých je tato metoda založena.

2.1 Teoretická podstata bezdotykového měření teploty

2.1.1 Tepelné záření

Každé těleso o povrchové teplotě vyšší, než je absolutní nula ($0\text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$), vysílá elektromagnetické záření odpovídající jeho teplotě. Bezkontaktní měření teploty využívá část spektra tohoto záření, která leží v rozsahu vlnových délek od $0,4\ \mu\text{m}$ do $1\ \text{mm}$ a zahrnuje oblast viditelného světla ($0,4\ \mu\text{m} - 0,78\ \mu\text{m}$) a oblast infračerveného záření ($0,78\ \mu\text{m} - 1\ \mu\text{m}$), které se taky nazývá tepelné záření [1].

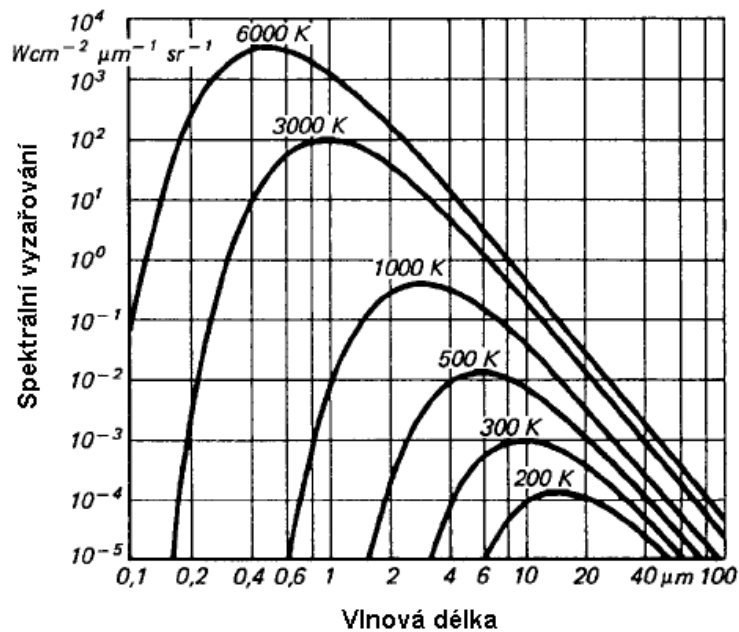


Obrázek 1: Poloha infračerveného spektra

Základním vztahem pro bezdotykové měření teploty je **Stefan-Boltzmannův zákon** [2],

$$E = \sigma * T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (1)$$

který říká, že intenzita zářivého toku $E [W \cdot m^{-2}]$ generovaná z jednotky plochy zdroje na všech vlnových délkách je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty $T [K]$ tělesa (Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,68 * 10^{-8} [W * m^{-2} * K^{-4}]$).



Obrázek 2: *Vyzařovací charakteristika černého tělesa v závislosti na teplotě*

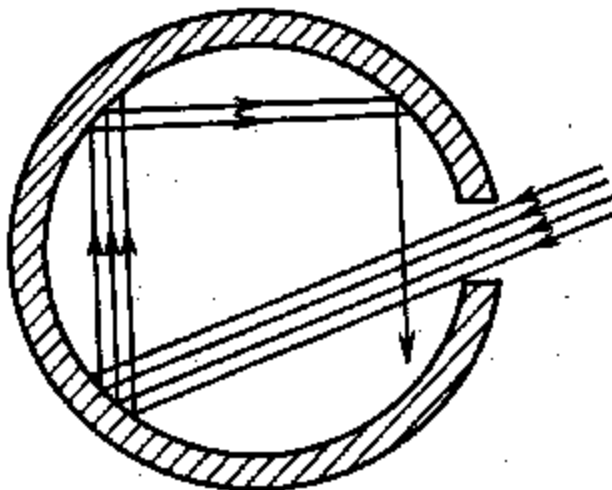
S rostoucí teplotou se mění vlnová délka, na níž je intenzita vyzařování nejvyšší. Tuto závislost vyjadřuje **Wienův posunovací zákon** [2].

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (2)$$

Z tohoto zákona plyne, že s rostoucí teplotou vyzařujícího tělesa klesá vlnová délka maximální intenzity záření, tj. toto záření se posouvá do oblasti viditelného světla, čímž se dá vysvětlit změna barvy rozžhavených těles.

2.1.2 Absolutně černé těleso

Výše uvedené zákony platí pouze pro tzv. **absolutně černé těleso**. Je to těleso, které pohlcuje jakékoliv záření dopadající na jeho povrch a zároveň vyzařuje na všech vlnových délkách při dané teplotě maximální dosažitelnou energii zářivého toku [1]. V přírodě neexistuje žádný materiál, který by vykazoval vlastnosti absolutně černého tělesa. V praxi ale lze vytvořit model absolutně černého tělesa za pomoci světelně neprostupné kavity s otvorem, jehož plocha je mnohem menší než plocha vnitřního povrchu kavity.

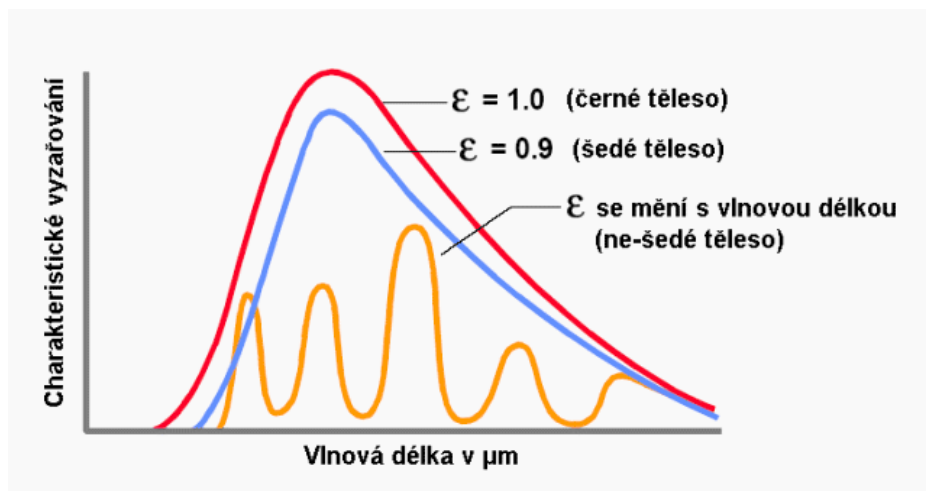


Obrázek 3. Absolutně černé těleso

2.1.3 Emisivita

Jak se uvádělo výše, absolutně černé těleso je ideální teoretický objekt neexistující v reálném světě. Ve skutečnosti je intenzita vyzařování reálných materiálů menší než intenzita vyzařování absolutně černého tělesa. **Emisivita** ε je číselný poměr zářivého toku reálného tělesa q a zářivého toku absolutně černého tělesa q_0 , které tato

dvě tělesa vyzáří za stejných podmínek. Obvykle emisivita není konstantní a mění se s vlnovou délkou záření. Z tohoto důvodu byl zaveden pojem **šedé těleso**. Je to takové těleso, jehož intenzita vyzařování není závislá na vlnové délce. Zase platí, že neexistuje takový materiál, jehož vlastnosti by odpovídaly vlastnostem šedého tělesa. Nicméně existuje řada materiálů, které v určitém rozsahu vlnových délek vykazují nezávislost emisivity na vlnové délce a tyto materiály se dají považovat za šedá tělesa [1].



Obrázek 4: *Intenzita vyzařování různých typů zářičů*

Emisivita je velmi důležitým parametrem, který je nezbytné znát, pokud chceme dosáhnout přesných výsledků bezdotykového měření teploty. Špatně určená emisivita je nejčastějším zdrojem chyb měření. Pro správné nastavení emisivity můžeme použít řadu metod [1].

1. Vyhledání emisivity v tabulkách vlastností materiálů

Obvykle v tabulkách můžeme najít nejenom hodnoty emisivity, ale i rozsah vlnových délek, pro které tato hodnota platí. Avšak tyto hodnoty bychom měli brát spíše jako orientační, protože emisivita může být ovlivněna dalšími faktory (například stavem povrchu a jeho úpravou – leštěný, broušený, zkorodovaný...).

2. Kalibrace ohřátím na známou teplotu

Objekt, jehož emisivitu chceme zjistit, ohřejeme na nějakou předem známou teplotu a postupnou úpravou emisivity na měřicím přístroji dosáhneme takové její hodnoty, při které se bude naměřená teplota shodovat se známou. Při použití

této metody pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí může dojít k ochlazování povrchu během doby, kdy je emisivita na měřicím přístroji nastavována na nutnou hodnotu.

3. Použití samolepky nebo nátěru o známé emisivitě

Na objekt se nalepí plastová samolepka, jejíž emisivitu známe. Nastavíme emisivitu přístroje a odečteme teplotu samolepky a poté se měří teplota povrchu objektu. Obdobným způsobem jako v minulém případě nastavujeme emisivitu, dokud teplota povrchu bez nálepky nebude odpovídat teplotě nálepky. Místo samolepky se dá také použít černou matnou barvu, která má emisivitu kolem 0,95.

2.1.4 Termokamery a pyrometry

Hlavními zařízeními pro provedení bezdotykového měření teploty jsou **termokamery** a **pyrometry**. **Pyrometry** jsou jednodušší přístroje, které dokážou bezdotykově snímat teplotu v jednom bodě či střední hodnotu teploty v nějaké oblasti [3]. **Termokamery** jsou zařízení využívající infračervené záření pro sestavení obrazu, který se nazývá **termogram** a znázorňuje rozklad teploty na povrchu zkoumaného objektu [4]. Termokamery a pyrometry fungují na stejném principu, avšak zatímco detektor pyrometru se skládá z jednoho teplotního senzoru, detektor termokamery je maticí takovýchto prvků. Termokamery se dají rozdělit podle typu detektoru na [3]

- **termokamery s tepelným detektorem**

Je to nejběžnější typ termokamer. Senzory mění svoje elektrické vlastnosti při ohřevu infračerveným zářením – například odporové teploměry nebo pyroelektrické prvky. Oproti kamerám s kvantovým detektorem má tento typ kamer nižší teplotní citlivost, rozsah vlnových délek, rychlost snímání obrazu a rozlišení. Avšak jsou levnější a mohou být jak stacionární, tak i ruční.

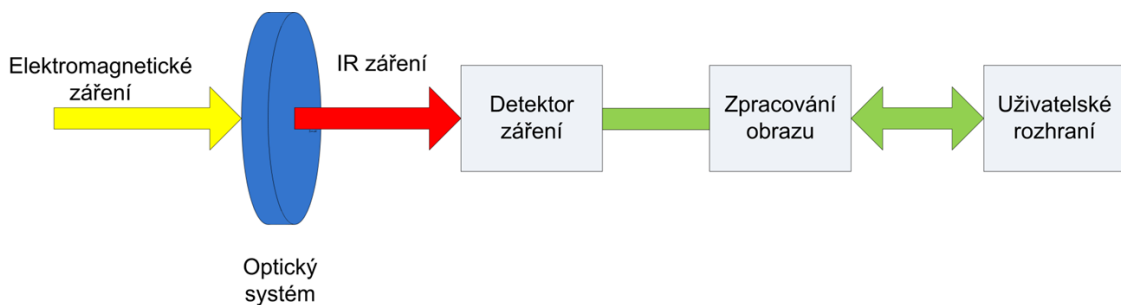
- **termokamery s kvantovým detektorem**

U tohoto typu kamer je detektor vždycky chlazený, protože vyžadují provoz při nízkých teplotách. Z tohoto důvodu jsou těžké a pouze stacionární. Díky svým vlastnostem jsou většinou používány pro vědecké a výzkumné účely.

Pyrometry většinou využívají detektory tepelného typu a mohou být **úhrnné**, schopné měřit na celém rozsahu vlnových délek, **monochromatické**, využívající úzké spektrální pásmo v oblasti viditelného záření, nebo **pásmové**, měřící v omezeném rozsahu vlnových délek, který je širší než u monochromatických. Existují také pyrometry s automatickým nastavením emisivity umožňující měření bez znalosti emisivity [5].

2.1.5 Princip činnosti termokamer

Termokamery fungují jako klasické optické kamery. Optika soustředí na detektoru elektromagnetické záření z prostoru. Protože na detektor smí dopadat jenom ta část elektromagnetického záření, která je důležitá pro bezdotykové měření teploty, optika musí zároveň fungovat jako filtr a proto je nutno používat speciální optické materiály, například germanium.



Obrázek 5. *Blokové schéma termokamery*

Detektor převádí infračervené záření na elektrický signál, který je posílán na zpracování elektronikou a následně je prezentován uživateli jako termogram přes uživatelské rozhraní [4].

2.1.6 Přehled parametrů termokamer

Termokamera, jako jakýkoliv měřicí přístroj, má řadu parametrů, které ovlivňují její provozní vlastnosti. Mezi tyto parametry patří: [6]

- **teplotní rozsah**

Definuje nejmenší a největší teplotu, kterou termokamera je schopna měřit.

Udává se ve stupních Celsia [$^{\circ}\text{C}$]. Některé kamery dovolí přepínat mezi několika teplotními rozsahy, na kterých záleží citlivost kamery.

- **spektrální rozsah**

Obdobně jako teplotní rozsah, spektrální rozsah definuje pásmo vlnových délek, ve kterém je kamera schopna zaznamenat infračervené záření. Udává se v nanometrech [nm].

- **přesnost měření**

Absolutní chyba měření. V současné době většina kamer má přesnost kolem $\pm 2^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ z naměřené teploty, přičemž platí ta chyba, která je větší. Nejlepší kamery jsou schopné měřit s přesností $\pm 1^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 1\%$.

- **teplotní citlivost**

Je definována pomocí parametru **NETD** (Noise Equivalent Temperature Difference), který udává minimální rozdíl teplot, který vyvolá signál překonávající vlastní šum kamery, tj. minimální rozdíl teplot, který je kamera schopna zaznamenat. Střední hodnotou tohoto parametru pro současné kamery je 50 mK , u nejcitlivějších může dosáhnout až 13 mK .

- **rozlišení detektoru**

Tento parametr závisí na hustotě mřížky detektoru a je udáván v pixelech. Definuje rozlišení termogramu, který se dá vytvořit pomocí dané kamery. Běžnými hodnotami rozlišení jsou 60×60 , 80×80 , 120×120 , 160×120 , 240×180 , 320×240 , 640×480 .

- **velikost zorného pole (FOV)**

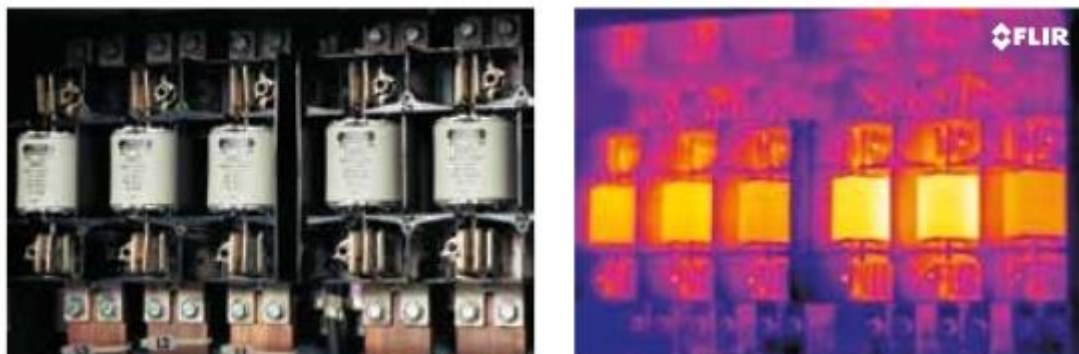
FOV říká, jak velká je oblast, kterou kamera je schopná zaznamenat. Závisí na optice kamery, dá se ovlivnit pomocí výměnných objektivů. Je udávána ve stupních (°) a pro různé směry (horizontální, vertikální) se může lišit.

3 Termografie

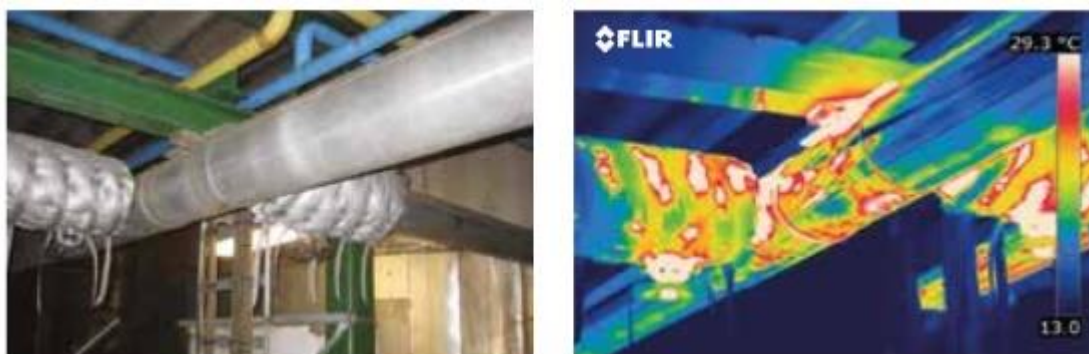
Infračervená termografie je metoda bezdotykového, nedestruktivního mapování teplotních polí zkoumaných objektů. V současné době se termografie uplatnila v mnoha oblastech jako prediktivní údržba, medicínský výzkum a zdravotnictví, stavebnictví, procesní technika, nedestruktivní testování a v jiných dalších aplikacích. Termografické metody mohou být rozdělené podle přístupu k vyhodnocování teplotního pole na **kvalitativní** a **kvantitativní** a podle provedení na **pasivní** a **aktivní**. Kvalitativní termografie se zabývá především kontrastem a porovnáním dvou teplotních polí bez ohledu na absolutní hodnoty teplot, zatímco kvantitativní se zaměřuje na vyhodnocování stavu měřeného objektu měřením přibližných hodnot teploty [5].

3.1 Pasivní termografie

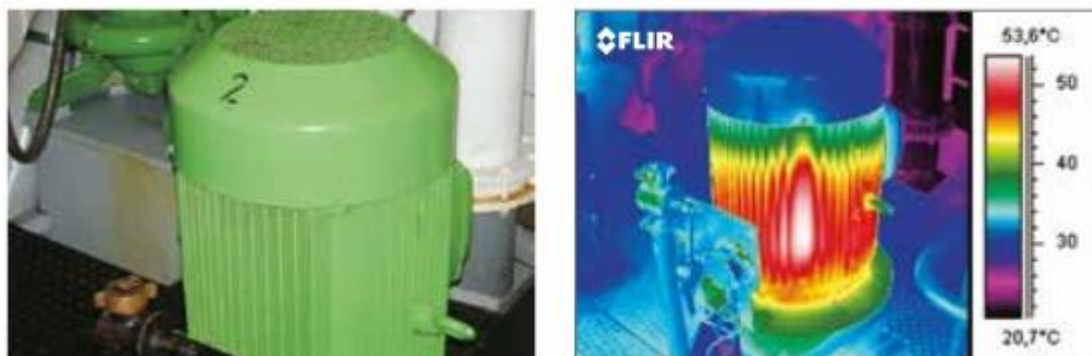
Pasivní termografie je dnes nejčastějším způsobem termografického výzkumu. Spočívá v měření vlastního teplotního pole objektu v jeho přirozeném stavu. Nejčastěji se používá v případech monitorování elektrických nebo mechanických objektů, jejichž činnost je spojená s vývinem tepla během provozu. Tak se dá zjistit opotřebení mechanického prvku, který generuje teplo vlivem tření nebo nepřípustný ohřev částí elektrických zařízení ztrátovým výkonem, například spínačů, izolátorů, vinutí elektromotorů atd. Taky se používá ve stavebnictví pro detekci úniku tepla z budovy a hlídání poruch tepelné izolace a ve zdravotnictví [5].



Obrázek 6. Monitorování elektrických součástek



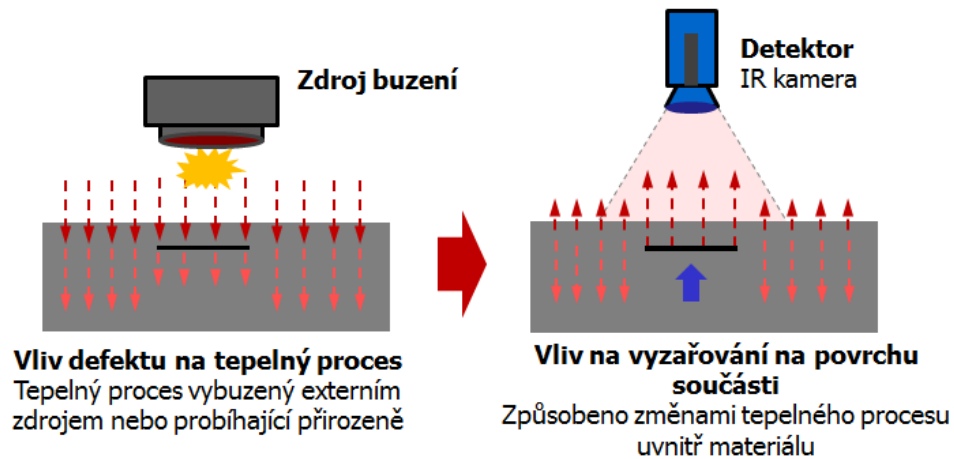
Obrázek 7. Detekce úniku tepla z potrubí



Obrázek 8. Monitorování ohřevu elektromotoru

3.2 Aktivní termografie

Aktivní termografie využívá externí zdroj pro vnesení tepelné energie do měřeného objektu. Materiálové defekty pak způsobí nehomogenity teplotního pole, což je pak detekováno pomocí teplotních rozdílů na povrchu materiálu. Pro aktivní termografii lze použít různé zdroje tepla: laserový ohřev, výbojky, halogenové lampy, proud teplého vzduchu a další.



Obrázek 9. Princip aktivní termografie

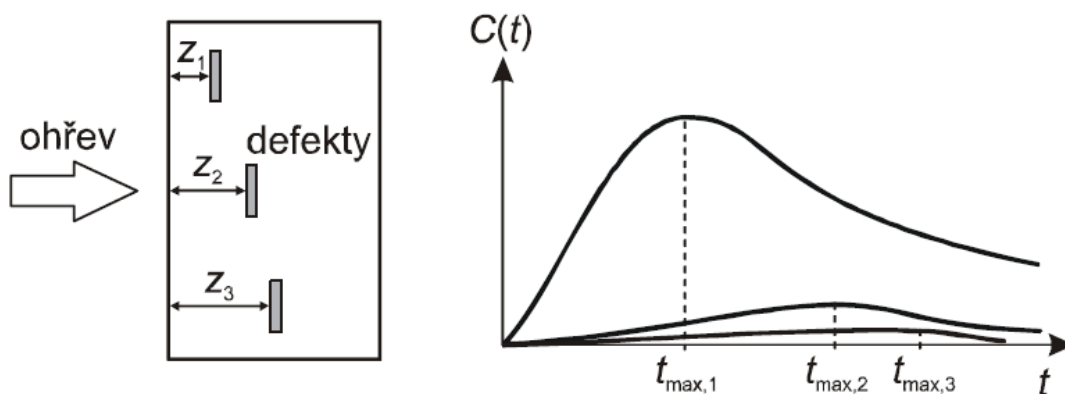
Jako alternativní zdroj tepla můžeme využít buzení vnitřním třením struktury hmoty tělesa prostupující ultrazvukovou vlnou nebo indukčním ohřevem externí cívkou u elektricky vodivých objektů. Při známých vlastnostech materiálu lze z teplotního obrazu vyhodnotit rozsah a hloubku podpovrchové vady teoreticky nebo srovnáním s etalonem. Důležité je nepřekročit teplotu, při které dojde k poškození vzorku [5].

Pro většinu případů, kromě jednodušších, nestačí jen statický ohřev zkoušeného objektu. Pokud chceme detailnější analýzu podpovrchových vad materiálu, musíme využít jednu z metod **dynamické termografie**, které spočívají v řízeném časově proměnném buzení objektu a následující analýze odezvy. Existuje několik metod dynamické termografie, které se liší přístupem k budicímu procesu a vyhodnocováním výsledného termogramu. Mezi tyto metody patří *pulzní termografie*, *metoda dlouhého pulzu* a *lock-in termografie*. [5]

3.2.1 Pulzní termografie

Pulzní termografie spočívá v rychlém (pulzním) externím nebo interním ohřevu tělesa a následném pozorování procesu ochlazování povrchu tělesa termokamerou a v jeho analýze. Podle uspořádání zdroje tepla, objektu a kamery se pulzní metoda dělí na **reflexní** a **průchodovou**. Při reflexním provedení jsou zdroj tepla a termokamera umístěny na stejné straně od objektu, zatímco při průchodové konfiguraci se vzorek nachází mezi termokamerou a zdrojem tepla, které jsou umístěné proti sobě. Výsledná odezva na tepelné buzení pak závisí na zvoleném provedení a je ovlivněná hloubkou

podpovrchové vady a jejími tepelnými vlastnostmi, které jsou zase ovlivněné rozměrem a tvarovým uspořádáním vady. V případě reflexního uspořádání, pokud je tepelná vodivost defektu větší než tepelná vodivost vlastního materiálu, ochlazování na povrchu nad ní bude probíhat rychleji než na povrchu částí nepoškozených a naopak, defekt o nižší teplotní jímavosti způsobí snížení rychlosti šíření tepelné vlny, což má za následek větší teplotu povrchu nad ní. Při průchodovém uspořádání je situace opačná. Vysoká tepelná vodivost defektu znamená to, že ohřev v tomto místě bude probíhat rychleji na straně termokamery. Ve všech případech dojde k nehomogenitě teplotního pole na povrchu objektu.[5]



Obrázek 10. Závislost časového průběhu teplotního kontrastu na hloubce defektu

Hloubka defektu se dá posoudit z časového průběhu standardního teplotního kontrastu, který je vypočítán podle následujícího vzorce [7]:

$$C(t) = \frac{T_{def}(t) - T_{def}(t_0)}{T_s(t) - T_s(t_0)} \quad [-] \quad (3)$$

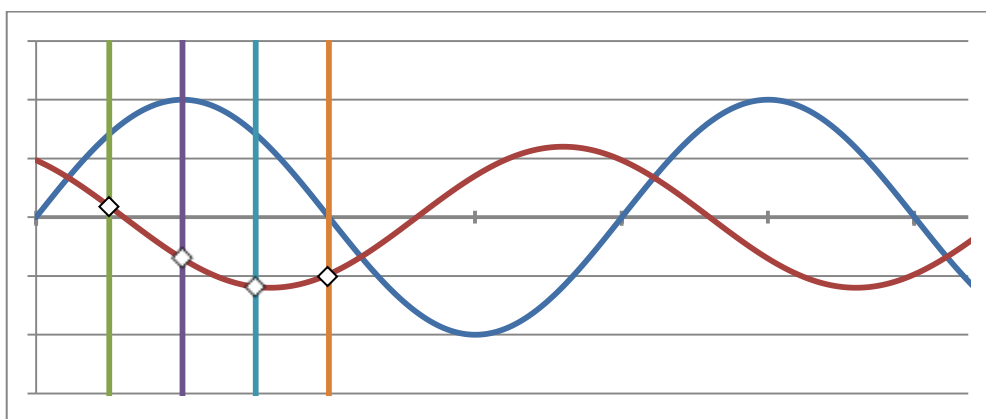
kde $C(t)$ je okamžitá hodnota standardního tepelného kontrastu, T_{def} je teplota povrchu v místě nad defektem, T_s je teplota povrchu v nepoškozené části objektu, t_0 je čas začátku ohřevu a t je čas v okamžiku, v němž chceme spočítat tepelný kontrast. Vady nacházející se ve větší hloubce se projevují později a s menším kontrastem.

Doba trvání pulzu závisí na tepelné vodivosti materiálu, například pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí, jako jsou kovy, je doba pulzu řádově v milisekundách, u méně vodivých materiálu (plasty, kompozity) může tato doba trvat do několika sekund.

Jinou pulzní metodou je tzv. **metoda dlouhého pulzu**, anglicky Step Heating (**SH**) nebo Time-Resolved Infrared Radiometry (**TRIR**). Tato metoda, na rozdíl od předchozí, používá méně výkonné zdroje tepla, ale délka tepelných pulzů je podstatně větší. Druhým rozdílem je to, že vyhodnocení teplotního pole probíhá od začátku i v průběhu budicího procesu a nejenom po jeho ukončení. [5]

3.2.2 Lock-in termografie

Metody uvedené výše mají jeden nedostatek: analýza amplitudy vede k ovlivnění výsledků měření prostředím, emisivitou tělesa a dalšími podmínkami, které snižují přesnost bezdotykového měření teploty. Tento nedostatek není přítomen u metody **lock-in termografie** (LT), která je založená na principu vyhodnocování fázového posunu. Amplitudově modulovaný zdroj tepla vyvolává v objektu tepelné vlny, které obvykle mají sinusový průběh. Po průchodu materiálem a vnitřními defekty či nehomogenitami tyto vlny mění svoji fázi a amplitudu a jsou zaznamenány měřicím přístrojem po celé ploše. Ze záznamu jsou pak vyjádřeny fázový posun a amplitudový poměr výsledné vlny vzhledem k původnímu signálu. Hlavně je vyhodnocován fázový posun, který, na rozdíl od amplitudy, není závislý na emisivitě, propustnosti atmosféry a ostatních faktorech. Údaje o fázi výstupního signálu lze získat dvěma způsoby: metodou čtyř bodů a Fourierovou transformací. [5]



Obrázek 11. Zjištění fáze pomocí korelací čtyřmi body

V prvním případě se provádí vzorkování výstupního signálu ve čtyřech bodech, posunutých o 90° neboli o čtvrt periody vstupního signálu. Z okamžitých hodnot signálu v těchto bodech se pak dá vypočítat amplitudu A a fázi φ podle následujících vztahů:[7]

$$A = \sqrt{(S1 - S3)^2 + (S2 - S4)^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{S1-S3}{S2-S4}\right) \quad (5)$$

Druhý způsob využívá Fourierovou transformací časového záznamu signálu, čímž dostaneme obrazy amplitudy a fáze ve frekvenčním prostoru.

Jak už bylo řečeno výše, hlavní výhodou metody lock-in termografie je absence ovlivnění měření vlastnostmi povrchu a prostoru, v němž je měření prováděno. Nevýhodou je náročnost na vybavení pracoviště, zejména modulovatelný zdroj tepla a výpočetní techniku.

4 Návrh experimentu

Jedním z úkolů pro tuto bakalářskou práci je návrh experimentu pro detekci skrytých vad materiálu využitím jedné z metod dynamické termografie. Nicméně před vlastním návrhem je nutné provést průzkum vybavení termografického pracoviště v laboratoři automatického řízení, především měřicích přístrojů a tepelných zdrojů, protože, jak se uvádělo výše, každá z metod dynamické termografie má svoje nároky na realizaci.

4.1 Přehled stávajícího stavu termografického pracoviště v laboratoři automatického řízení

Veškerá pracoviště pro dynamickou termografii mají obsahovat minimálně tři prvky: měřicí přístroj pro zaznamenání teploty, kterým nejčastěji bývá termovizní kamera, zdroj vnějšího tepelného buzení a výpočetní technika na zpracování dat získaných z přístroje.

4.1.1 Měřicí technika

Pro snímání teplotního pole na povrchu zkušební vzorku je používána kamera **FLIR A5** z modelové řady **FLIR Ax5** od společnosti **FLIR Systems**, která je největším světovým výrobcem a dodavatelem termovizních zařízení. Základní parametry jednotlivých kamer z této řady jsou uvedeny v následující tabulce. [8]

	FLIR A65	FLIR A35	FLIR A15	FLIR A5
Rozlišení detektoru	640x512 px	320x256 px	160x128 px	80x64 px
FOV	45° x 37° nebo 25° x 20°	48° x 39° nebo 25° x 19°	48° x 39° nebo 25° x 19°	44° x 36° nebo 25° x 20°
Vzorkovací frekvence	7.5 Hz/30 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Teplotní rozsah	-25°C až +135°C / -40°C až +550°C			
Teplotní citlivost (NETD)	0.05°C / 50 mK při +30°C			
Přesnost měření	±5° nebo ±5% z naměřené hodnoty			

Tabulka 1. Základní parametry kamer řady *FLIR Ax5*

Mezi ostatní vlastnosti patří kompaktnost, dostupná cena a hlavně podpora důležitých standardů jako **GigE Vision**, který odpovídá za přenos videa přes protokol **Gigabit Ethernet, PoE** (Power over Ethernet), umožňující současné napájení a datový přenos jedním kabelem a **GenICam** (Generic Interface for Cameras), který je univerzálním programovým rozhráním pro všechny typy kamer podporující tento standard, nezávislé na použitém protokolu přenosu dat.



Obrázek 12. Termokamera FLIR A5

4.1.2 Zdroj tepelného buzení

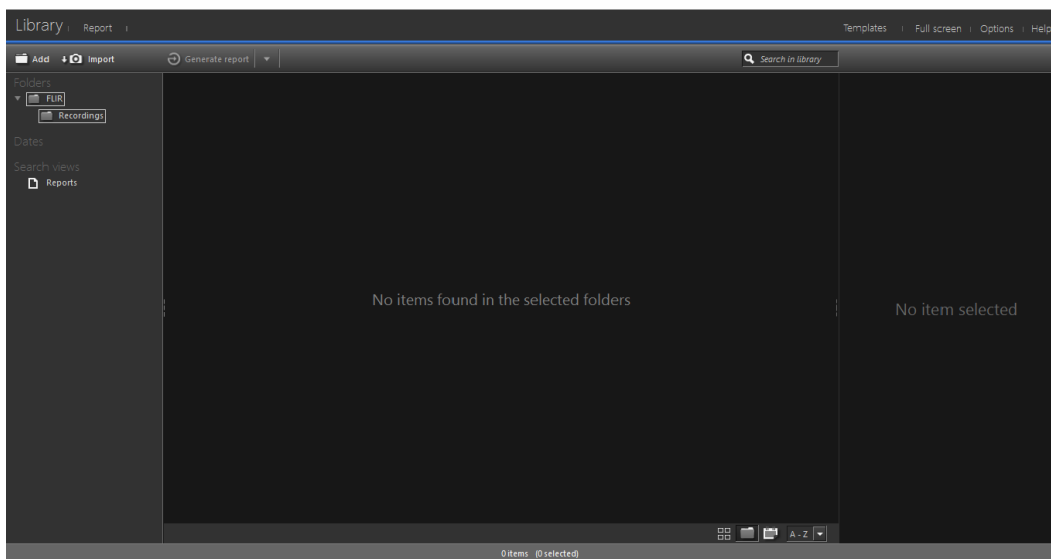
Pro účely vyvolání tepelné stimulace v materiálu je termografické pracoviště v laboratoři automatického řízení vybaveno dvěma zdroji tepelného záření: halogenovým reflektorem a stroboskopem. Reflektor o výkonu 400 W je využíván spíše jako pomocný zdroj tepla z důvodu dlouhé doby ohřevu materiálu. Primárním zdrojem tepla je stroboskop s xenonovou výbojkou o výkonu 1500 W a možností připojení řídicího signálu 10 V přes konektor 6,3 mm mono jack. Stroboskop je schopen pracovat jenom v režimu krátkých pulzů, ale maximální doporučená frekvence 12 Hz dovolí nahradit jeden dlouhý pulz sérií krátkých.



Obrázek 13. *Stroboskop EUROLITE SUPERSTROBE 2700*

4.1.3 Výpočetní technika a software

Pro zaznamenávání a zpracování dat přijatých z termokamery je používán osobní počítač s nainstalovaným operačním systémem Windows. Pro práci s termokamerou je původně k dispozici program **FLIR Tools** či **FLIR Tools+ (Plus)** od dodavatele termokamery FLIR Systems.

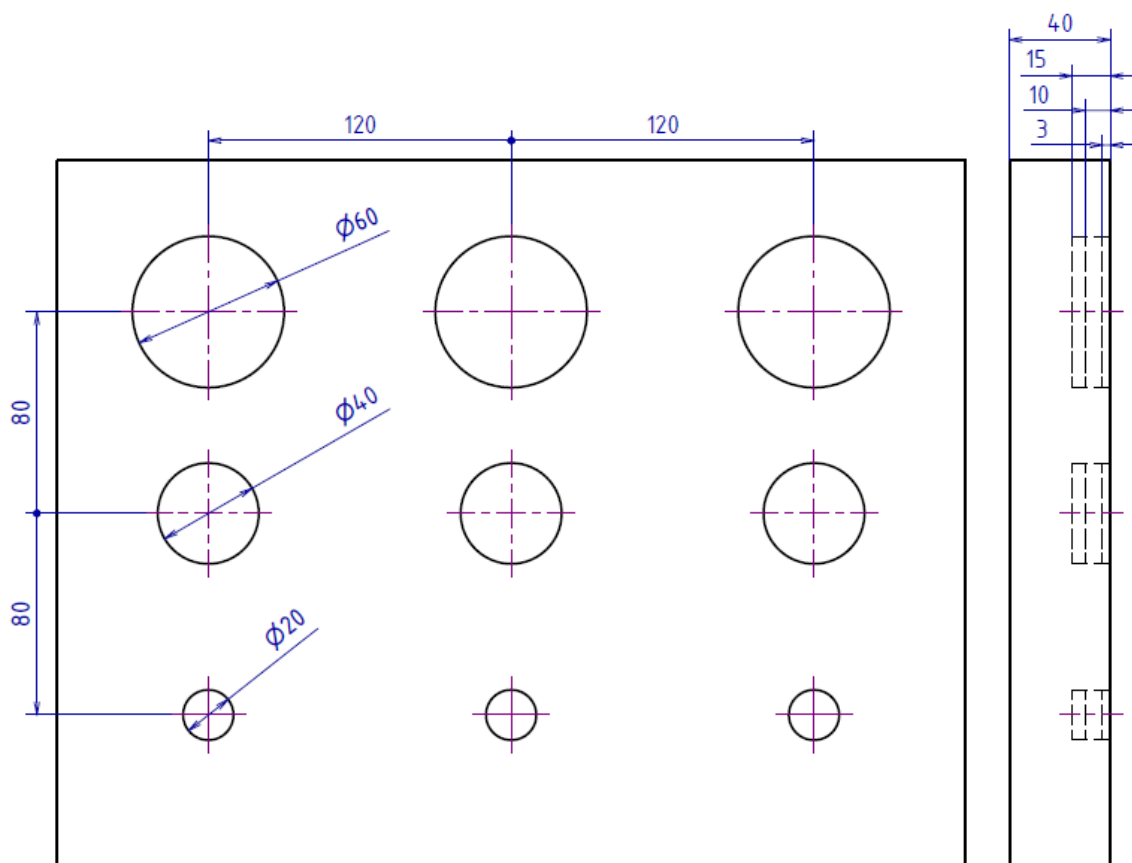


Obrázek 14. *Uživatelské rozhraní programu FLIR Tools+*

Mezi možnosti programu patří záznam videa z termokamery, nastavení parametrů termokamery jako teplotní rozsah a vzorkovací frekvence, úprava podmínek měření (emisivita, odrazivost a propustnost materiálu, teplota okolí a krytu kamery), výběr nástrojů pro kreslení oblastí měření (bod, obdélník, elipsa) a zobrazení polohy a průběhu v bodech maximální a minimální teploty uvnitř těchto oblastí, nastavení palety pro zobrazování termogramu, ruční a automatické nastavení rozsahu zobrazovaných teplot a možnost práce s radiometrickými snímky. Verze **Plus** je rozšířenou verzí programu, pro kterou je potřeba nakoupit licenci. Má navíc možnost ukládání grafů průběhu teplot, sjednocování obyčejných a termografických snímku do jednoho obrázku a nahrávání a přehrávání termografických video sekvencí. [9]

4.1.4 Zkušební vzorek

Roli zkušebního tělesa hrají tepelně izolované dveře karavanu. Konstrukčně se skládají z vnějšího ocelového plechu a plastového krytu, mezi kterými je prostor vyplněný tepelně izolační pěnou z polyuretanu. Pro účely experimentálního ověření metod nedestruktivního testování dynamickou termografií byla část plechu odstraněna a udělalo se několik umělých vad v tepelné izolaci. Jsou představované třemi sadami slepých otvorů o různých hloubkách. Průměry otvorů jsou 2 cm, 4 cm, 6 cm a hloubky jsou 3 mm, 1 cm a 1,5 cm. Tloušťka nepoškozené izolace; v měřené části je 4 cm.



Obrázek 15. *Uspořádání otvorů na zkušebním vzorku*



Obrázek 16. *Zkušební vzorek*



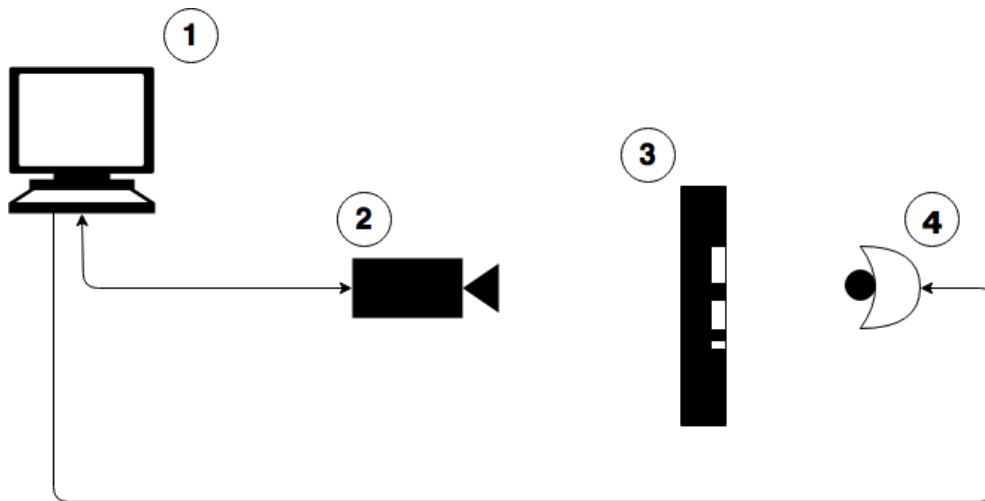
Obrázek 17. Zkušební vzorek

4.2 Experiment

Po několika předběžných měřeních se ukázalo, že metoda krátkých pulzů není vhodná k použití pro daný zkušební vzorek z toho důvodu, že jeho vysoká tepelná odolnost a nízký výkon zdroje tepla zabrání vyvolání viditelných tepelných změn na povrchu tělesa krátkým pulzem. Obdobný problém se vyskytnul i u metody lock-in. Protože jedinou možností, jak dosáhnout sinového průběhu intenzity vyzařování zdroje tepla (stroboskopu) je frekvenční modulace, při nízkých hodnotách intenzity vyzařování byla frekvence pulzů tak nízká, že vysoká tepelná setrvačnost vzorku zase zabránila průchodu materiálem jednotlivých pulzů. Tudíž jsem rozhodl, že jedinou snadno využitelnou (dokonce i postačující) metodou pro tento případ je metoda dlouhých pulzů, step heating.

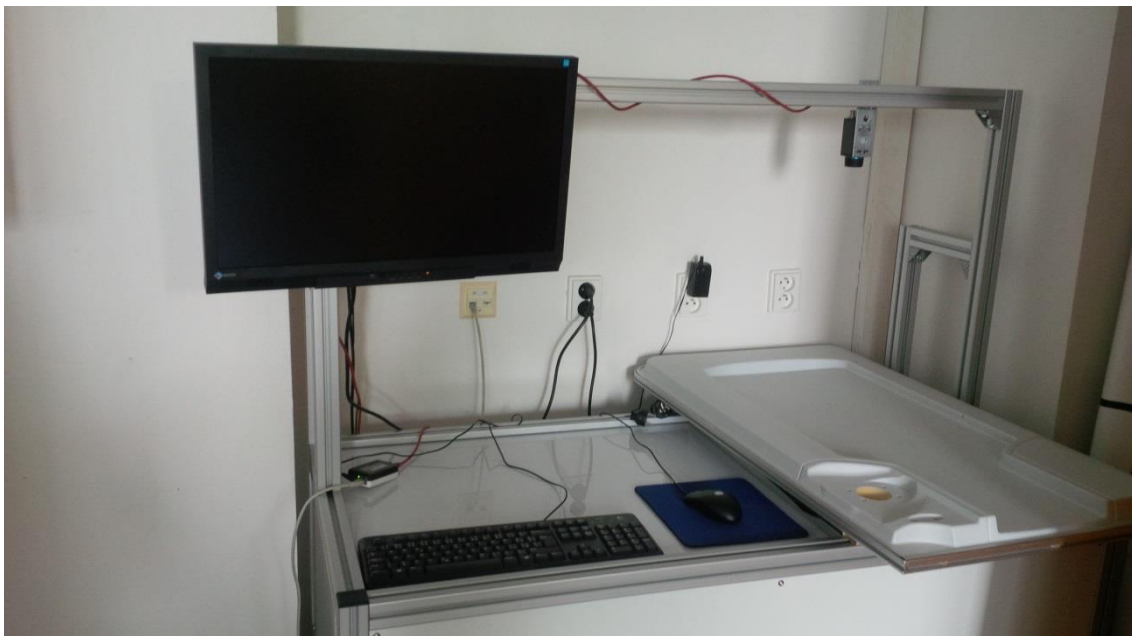
4.2.1 Uspořádání pracoviště

Dané pracoviště využívá průchodovou konfiguraci, při které je vzorek umístěn mezi termokamerou a zdrojem tepla.



Obrázek 18. *Uspořádání termografického pracoviště – (1) osobní počítač, (2) termokamera, (3) zkušební vzorek, (4) zdroj tepla*

Kamera je připevněna ke konzole ve vzdálenosti 35 cm nad zkušebním vzorkem. Poloha termokamery byla zvolena tak, aby kamera byla schopna zaznamenávat část povrchu, kde se nacházejí dvě sady uměle udělaných vad o hloubkách 1 cm a 1,5 cm. Stroboskop a reflektor jsou stejným způsobem umístěny pod vzorkem ve vzdálenosti přibližně 40 cm. Zdroje tepla, větrání a termokameru je možné ovládat jak ručně, tak i pomocí programového řešení, kterým se zabývá další kapitola této práce.



Obrázek 19. *Termografické pracoviště v laboratoři automatického řízení*

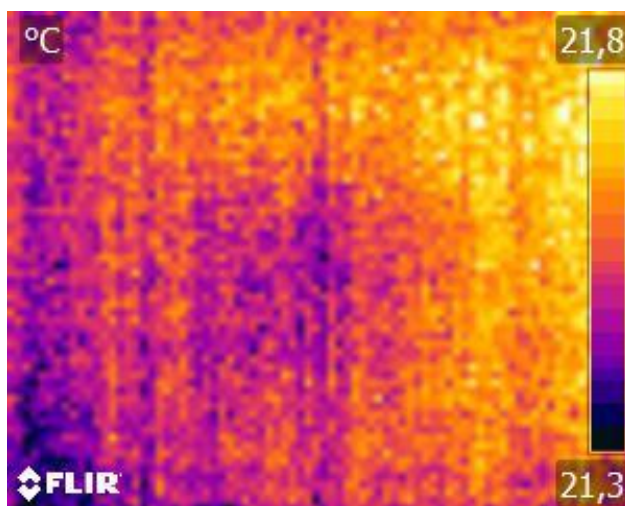
4.2.2 Postup při provedení experimentu

Poté, co umístíme vzorek na stole mezi kamerou a zdrojem tepla, musíme zjistit, jestli je jeho teplota ustálená a odpovídá teplotě prostředí, a provést nutná nastavení kamery a stroboskopu. Spustíme program FLIR Tools nebo Thermo Control Panel, vyvíjený jako další úkol této práce, a navážeme spojení s termokamerou. Pokud je na povrchu vzorku vidět nehomogenity teploty, musíme počkat, až teplota bude stejná na celém povrchu. Při použití FLIR Tools, nastavíme rozsah teplot kamery na nízké (-25°C až $+135^{\circ}\text{C}$), vzorkovací frekvenci na 30 Hz, zvolíme paletu a případně upravíme hodnoty emisivity. Nižší vzorkovací frekvence je doporučena z důvodu omezeného maximálního počtu bodů grafu. Při použití programu Thermo Control Panel je postup podobný. Otevřeme záložku *Settings*, nastavíme emisivitu a vybereme způsob výpočtu teploty pro příslušnou kameru, v tomto případě FLIR Ax5. Taky je možné změnit frekvenci záblesků stroboskopu (standardní hodnota je 12 Hz) a případně provést úpravu atributů kamery (není doporučeno, pokud není nutné). Vybereme body a oblasti, v nichž bude teplota zaznamenána do grafu a složku, do které se budou ukládat záznamy ve formátu *.csv*. Hlavně potřebujeme znát průběh teploty v místech nad defekty. Pokud neznáme jejich polohu na obraze z termokamery, můžeme spustit ohřev, dokud nebude vidět jedno nebo několik takových míst. V tomto případě ale musíme zase počkat na ochlazení vzorku, než začneme měřit. Preferovaným zdrojem tepla je stroboskop, který se dá provozovat ve třech režimech: dlouhý pulz (preferovaný pro tento experiment), série několika pulzů a modulace sinové vlny. Zvolíme potřebný režim záření a nastavíme jeho parametry. Ve chvíli, kdy skončíme přípravu pracoviště, můžeme začít vlastní měření. Záznam průběhu teploty musí probíhat od začátku ohřevu až po ustálení teploty vzorku po jeho chladnutí.

4.2.3 Výsledky experimentu a jejich vyhodnocení

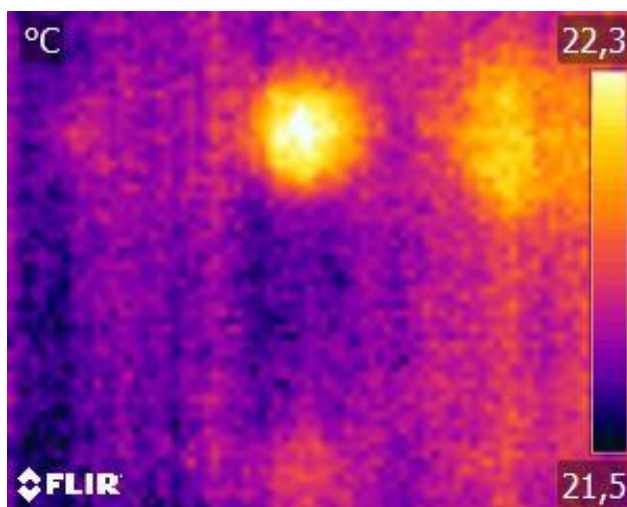
Bylo provedeno několik měření. Během prvního měření se zjistila doba ohřevu, potřebná pro zviditelnění na tepelném obraze každého z šesti otvorů. Protože tepelná

vodivost vzduchu uvnitř prázdných otvorů je vyšší než tepelná vodivost materiálu, očekává se, že teplota povrchu nad otvory bude vyšší než teplota nad plnými částmi. Před spouštěním ohřevu byl udělán jeden snímek za ustáleného stavu, na kterém je vidět, že horní pravá část měřené oblasti je o půl stupně vyšší, než teplota v levé dolní části.



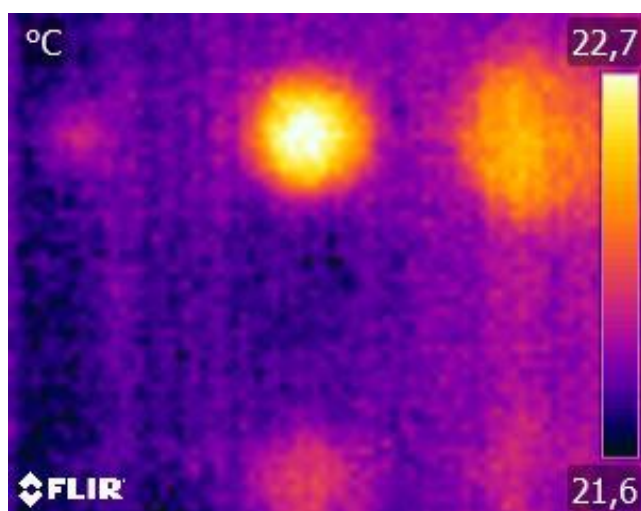
Obrázek 20. Termogram povrchu měřené oblasti před začátkem ohřevu

Tento jev se vyskytoval při inspekci jakékoliv oblasti měřeného vzorku na obou jeho stranách, z čehož se dá odvodit to, že tato nehomogenita teplotního pole byla způsobená vlivem prostředí, ve kterém se nachází pracoviště, pravděpodobně na teplejší část dopadá víc záření z prostředí.

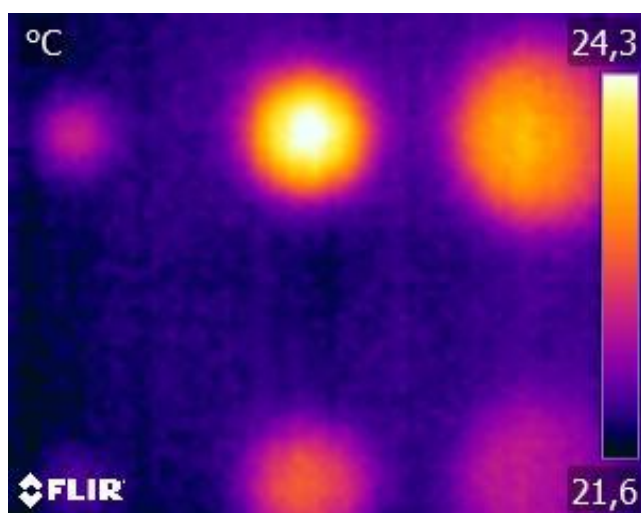


Obrázek 21. Termogram povrchu po uplynutí 60 sekund od začátku ohřevu

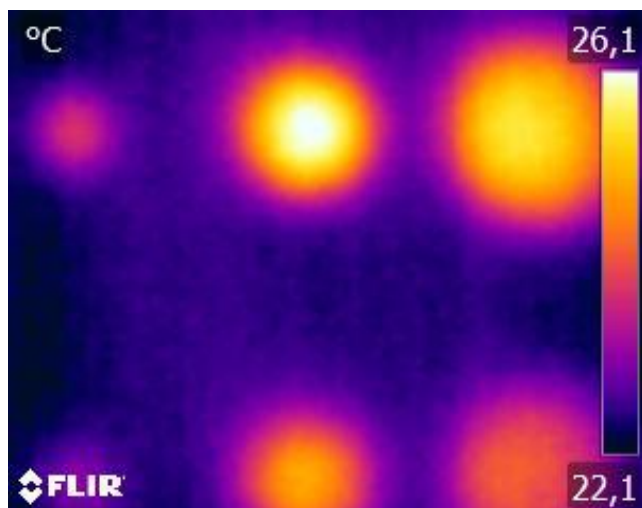
První se zviditelnily, jak se očekávalo, otvory o průměrech 4 cm a 6 cm a hloubce 1,5 cm během 50 sekund po zahájení měření. Dobře rozlišitelné jasnosti dosáhly po 60 sekundách. Další se začaly pomalu objevovat kolem 90. sekundy otvory o stejných průměrech, ale o hloubce 1 cm, a otvor o průměru 2 cm a hloubce 1,5 cm. Po 2 minutách a 30 sekundách se zviditelnil poslední otvor o průměru 2 cm a hloubce 1 cm. Poslední snímek byl udělán ve 3. minutě a 30 sekundách, ve chvíli kdy byl jasně viditelný každý ze šesti otvorů.



Obrázek 22. Termogram povrchu po uplynutí 90 sekund od začátku ohřevu

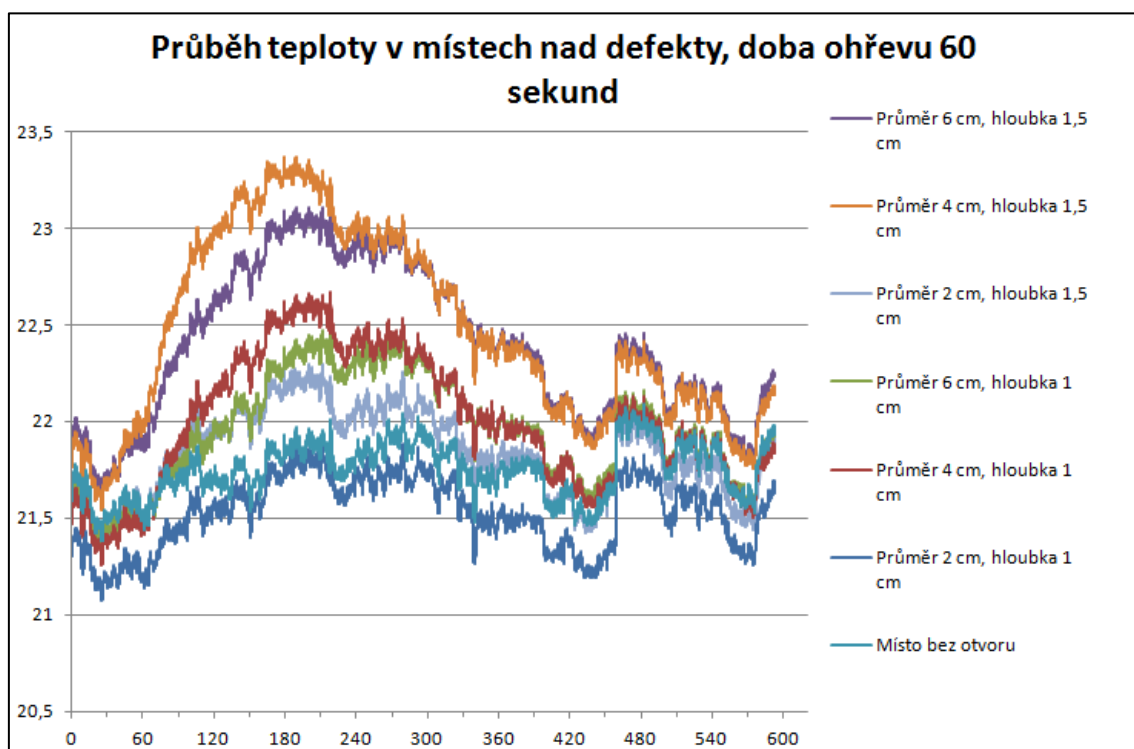


Obrázek 23. Termogram povrchu po uplynutí 2 minut a 30 sekund od začátku ohřevu

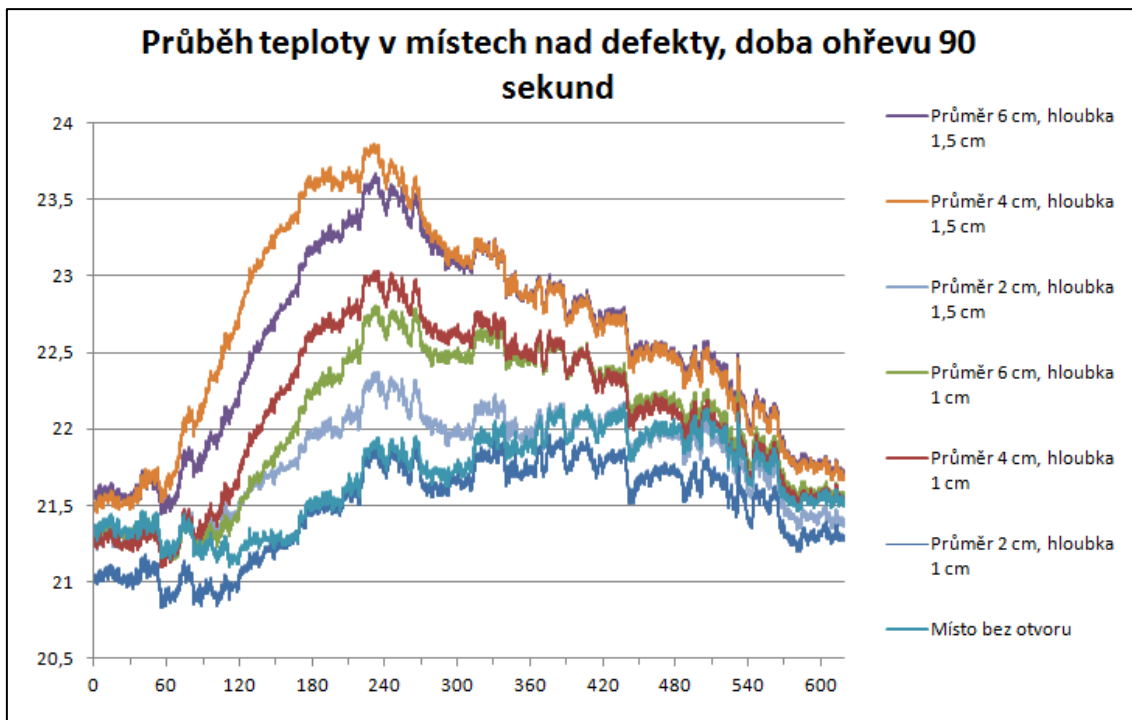


Obrázek 24. Termogram povrchu po uplynutí 3 minut a 30 sekund od začátku ohřevu

Na základě prvního měření byly zvolené dvě doby pro další měření: 60 a 90 sekund. Průběhy naměřených teplot vypadají následovně:



Obrázek 25. Průběh teploty v místech nad defekty



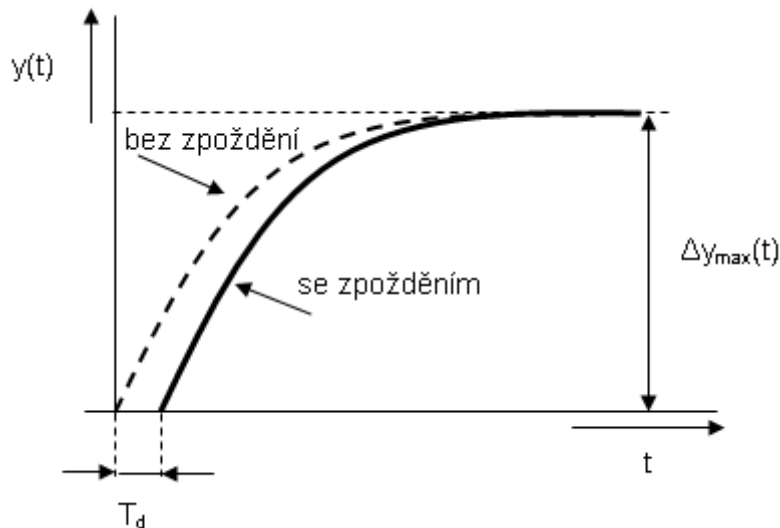
Obrázek 26. Průběh teploty v místech nad defekty

Rozdíl teplot na začátku obou měření byl způsoben výše uvedeným vlivem prostředí. Během měření kamera několikrát prováděla automatickou recalibraci, což mělo za následek vyskytování náhlých skoků teploty na průbězích. Kvůli těmto skokům se nepodařilo spočítat průběh standardního tepelného kontrastu podle vzorce (3) a proto jsem musel najít jiný způsob vyhodnocení naměřených dat.

Z grafů je vidět, že časový průběh teploty je možné aproximovat přechodovou charakteristikou systému 1. řádu s dopravním zpožděním, jehož přenos má následující tvar: [10]

$$G(s) = \frac{K}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} \quad (6)$$

kde K je zesílení systému, T_1 je časová konstanta systému a T_d je dopravní zpoždění. Existuje několik metod, kterými je možné aproximovat tyto koeficienty z přechodové charakteristiky.



Obrázek 27. Přejchodová charakteristika soustavy s dopravním zpožděním

Zvolenou metodou je aproximace dvěma body [10], spočívající v tom, že z přechodové charakteristiky určíme dva časové okamžiky $t_{0,28}$ a $t_{0,63}$, ve kterých její hodnota dosahuje 28% a 63% od hodnoty v ustáleném stavu. T_1 a T_d se pak vypočítají následovně:

$$T_d = 1,5 * (t_{0,28} - \frac{1}{3}t_{0,63}) \quad (7)$$

$$T_1 = 1,5 * (t_{0,63} - t_{0,28}) \quad (8)$$

Hodnoty časových konstant aproximované z průběhu teploty pro dobu ohřevu 90 sekund a otvory o průměrech 4 cm a 6 cm, jsou v následující tabulce:

	4 cm		6 cm	
Hloubka	T_d [s]	T_1 [s]	T_d [s]	T_1 [s]
1 cm	97	71,8	135,5	68,8
1,5 cm	54,7	71,3	86	60

Tabulka 2. Výsledky měření

Vypočítané hodnoty odpovídají poměrně dobře zaznamenaným průběhům teplot nad otvory z prvního měření. Přitom je patrné, že dopravní zpoždění T_d závisí hlavně na hloubce defektu, zatímco časová konstanta T_1 závisí především na jeho průměru.

5 Změny hardwaru a realizace softwarového řešení pro provedení experimentu

Dalším úkolem této práce je návrh a provedení hardwarových změn a implementace softwarového řešení, které by umožnilo ovládání experimentu přes jedno programové rozhraní.

5.1 Navržené a provedené změny hardwaru termografického pracoviště

První záležitostí, kterou musíme vyřešit, je ovládání akčními prvky, v našem případě se jedná hlavně o zdroje tepla, to jest reflektor a stroboskop. Pro tyto účely se obvykle používají zařízení pro sběr dat neboli **data acquisition (DAQ)**, která slouží nejenom jako vstup pro data ze senzorů, ale také pro odesílání řídicích signálů. Avšak v tomto případě hraje roli měřicího přístroje termokamera a proto potřebujeme co nejlevnější řešení s možností řízení. Druhým bodem je nutná instalace větracího systému. Kvůli uzavřené konstrukci stolu dochází mezi zkušebním vzorkem a zdrojem tepla k akumulaci ohřátého vzduchu, který může způsobit narušení požadovaného průběhu ohřevu materiálu a zvětšit dobu mezi experimenty potřebnou na ochlazování a ustálení teploty vzorku. Pro řízení reflektoru a větrání je potřeba zvolit správná relé, která by bylo možné ovládat napětím na výstupu zvoleného řídicího prostředku a která by byla schopná spínat střídavé napětí 220 V.

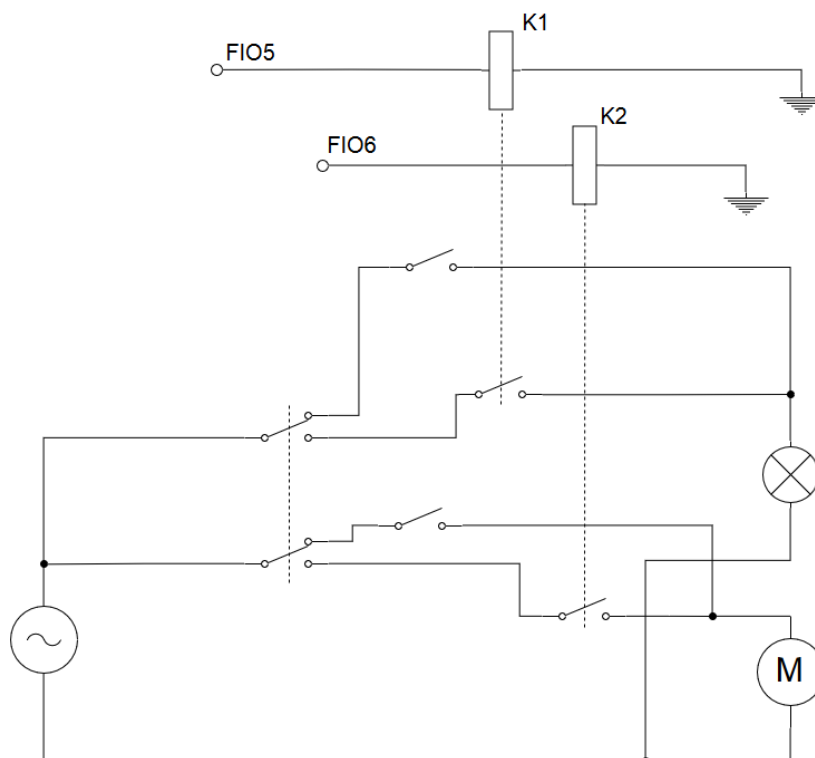
5.1.1 Zvolená řešení

Vybraným prostředkem pro řízení je měřicí karta **LabJack U3-HV** od společnosti **LabJack Corporation**, která vyrábí řádu přístrojů pro řízení a sběr dat.



Obrázek 28. Měřicí karta LabJack U3-HV

Disponuje 12 flexibilními porty, které můžou sloužit jako digitální vstupy/výstupy nebo analogové vstupy, 4 jednoúčelovými porty pro tzv. vysokonapěťové analogové vstupy, 4 jednoúčelovými porty pro digitální vstupy/výstupy, 2 časovači/čítači a 2 D/A (digital to analog, digitálně analogový) převodníky. Maximální rozsah napětí na analogových vstupech je 0 až +3.6 V, na vysokonapěťových -10 až +20 V. Dva analogové výstupy mají rozsah 0 až 5 V s 10-bitovým rozlišením. Digitální vstupy/výstupy používají logické úrovně 0 a +3.3 V. Časovače mají několik režimů vstupu a výstupu, včetně možnosti pulzně-šířkové modulace výstupního signálu [11]. Jako vhodná relé jsem zvolil FINDER 36.11.9.003.4011 s cívkou o jmenovitém napětí 3 V. Také byl navržen jednoduchý operátorský panel pro možnost ručního ovládání reflektoru a větracího motoru pomocí mechanických spínačů a přepínání mezi dvěma režimy ovládání (ruční a programový). Schéma zapojení je na obrázku 27.



Obrázek 29. Schéma zapojení ovládacích prvků reflektoru a větracího motoru

5.2 Vývoj programu pro ovládání experimentu

I přesto, že výše uvedený program FLIR Tools je velmi užitečným nástrojem pro práci s termokamerami a termografickými snímky, pro snadnější provedení experimentů a měření na pracovišti dynamické termografie bylo potřeba implementovat softwarové řešení, které by umožňovalo ovládat všechny akční prvky a sbírat data přes jedno programové rozhraní.

5.2.1 Přehled možných řešení pro vývoj programu

Jedním z kritérií pro výběr prostředí, v němž bude program vyvíjen, byla současná podpora práce se standardy GenICam a GigE Vision a s měřicí kartou LabJack. Naštěstí, pro knihovnu UD, která je základní Windows knihovnou pro práci LabJack U3 v jazyce C nebo C++, existuje řada tzv. wrapperů, umožňujících volání

funkcí z této knihovny v jiných jazycích a prostředích. Tím pádem mezi prostředí, v nichž je možné vyvíjet aplikace pro LabJack, patří **LabVIEW**, **.NET**, **MATLAB**, **Java**, **Python** a mnohé další. Nicméně pro standardy GenICam a GigE Vision takový široký výběr není. Hlavními volbami jsou rozšíření **Vision Development Module** a **Image Acquisition Toolbox** pro LabVIEW a MATLAB, nebo dvě SDK pro C++/C#, **eBUS SDK** a **JAI SDK** od firem Pleora Technologies a JAI respektive. První dvě varianty byly odmítnuty kvůli nedostupnosti licencí na Image Acquisition Toolbox a nulové zkušenosti s prostředím LabVIEW autora práce. Dvě zbylé varianty docela vyhověly svojí podporou jazyku C#, se kterým autor měl příležitost krátce se setkat v minulosti, avšak vyžadovaly zkušenějšího programátora, než je autor, a proto byly nechané jako nouzové. Po dalším vyhledávání se našla ještě jedna možnost: **SmartVision SDK** od české firmy **Workswell**, která se zabývá vývojem a distribucí termovizního hardwaru a softwaru po celé Evropě. Pro účely termografického pracoviště v laboratoři automatického řízení bylo poskytnuto zdarma. Základem tohoto SDK (Software Development Kit) jsou dvě knihovny zkompileované do .dll souboru. Jsou to knihovna vytvořená v LabVIEW s funkcemi pro příjem a zpracování dat z kamery a knihovna vystupující v roli rozhraní mezi prostředím, ve kterém je použita a funkcemi LabVIEW. Podporovanými jazyky jsou C, C++, C#, Java a MATLAB.

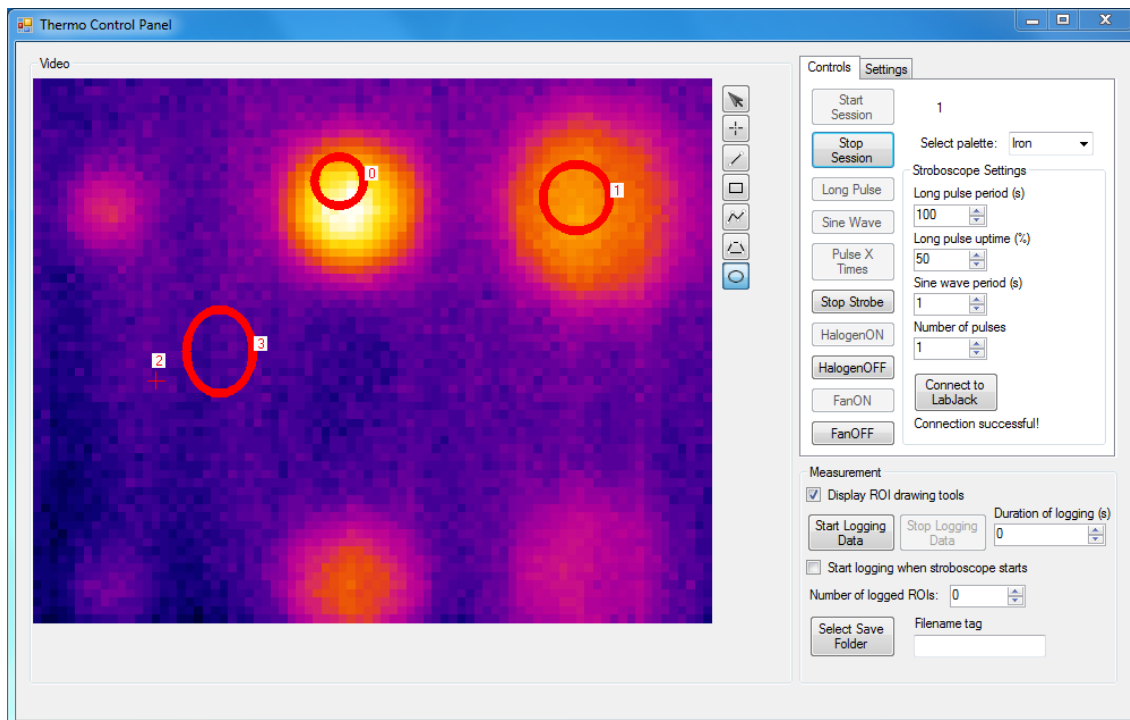
5.2.2 Popis programu

Program byl vytvořen v jazyce C# ve vývojovém prostředí *Microsoft Visual Studio 2015*. Grafické uživatelské rozhraní (**GUI**) je implementováno v **WPF** (Windows Presentation Foundation). Mimo obecné knihovny .NET, je program založen na dvou knihovnách: *LJUDDotNet.dll*, která odpovídá za komunikaci s LabJack a *smartvision_library.dll*, která odpovídá za komunikaci s termokamerou.

Otevření datového proudu z termokamery a připojení k ní je zahájeno metodou *OpenStreamThermo()*, beroucí jako argument název kamerového rozhraní, který se dá zjistit pomocí programu **Camera Explorer**, který je součástí SmartVision SDK. Po připojení ke kameře se otevře okno s obrazem z termokamery a je možné nastavovat její atributy a označovat na obrazu z kamery body a oblasti, ve kterých budou sbírána teplotní data. Sběr a uložení dat se provádí ve speciálním vlákne, které je spouštěno

tlačítkem *Start Acquisition*. Data se ukládají ve vybraném adresáři do .csv souboru pojmenovaného podle času zahájení měření.

Řízení stroboskopu je realizováno pomocí časovače na výstupu LabJack FIO4. Používaným režimem časovače je **16-bit PWM output**, při kterém se na výstupu objevují obdélníkové vlny o zadané frekvenci a střídě. Frekvence je nastavována pomocí jedné ze základních frekvencí, a divizoru, vynásobeného 2^{16} , který může nabývat hodnot od 1 do 256 a kterým je pak vydělena základní frekvence. Pro stroboskop jsou realizované tři provozní režimy: dlouhý pulz, modulace sinové vlny a série několika pulzů. Dlouhý pulz funguje jako obdélníkový výstup s tím rozdílem, že obdélníkový pulz je nahrazen sérii záblesků. U tohoto režimu se dá nastavit perioda a střída dlouhých pulzů. Sinová vlna je pokusem o dosažení sinového průběhu intenzity vyzařování pomocí frekvenční modulace obdélníkových pulzů sinovou vlnou. Nastavitelným parametrem je perioda kmitu sinové vlny. Posledním režimem je série několika pulzů, při kterém samozřejmě stroboskop udělá zadaný počet záblesků. Navíc, u dlouhého pulzu a se dá měnit také frekvence jednotlivých záblesků. Taky se dá jednoduše nastavovat úroveň logické jedničky nebo nuly na digitálních výstupech FIO5 a FIO6, což odpovídá řízení příslušných relé.



Obrázek 30. Uživatelské rozhraní programu *Thermo Control Panel*

Uživatelské rozhraní se dá rozdělit na tři oblasti: oblast termogramu, oblast řízení a oblast měření. Oblast řízení obsahuje dvě záložky, *Controls* a *Settings*. Záložka *Controls* obsahuje tlačítka pro připojení nebo odpojení termokamery, ovládání stroboskopu, reflektoru a větrání a pole pro nastavování parametrů stroboskopu. V záložce *Settings* se nacházejí volby, které by se měly nastavovat jednou před začátkem měření jako emisivita a způsob výpočtu teploty nebo by se neměly měnit, pokud není vážná příčina, například frekvence pulzů, jméno kamerového rozhraní, a ostatní atributy kamery. V oblasti měření se dá zapnout zobrazení nástrojů pro označení měřicích oblastí a počet těchto oblastí, ve kterých je teplota snímána, vybrat složku, do které se budou ukládat soubory s daty, dobu trvání měření a tlačítka pro zahájení a zastavení měření.

6 Závěr

Seznámil jsem s teoretickou podstatou bezdotykových měření teploty a základními principy dynamické aktivní termografie. Na základě jedné z metod dynamické aktivní termografie, používaných pro nedestruktivní testování materiálu, navrhl jsem a provedl jsem experiment, který se spočíval ve vyhodnocení časových průběhů teploty materiálu při ohřevu. Takže jsem implementoval softwarová a hardwarová řešení pro usnadnění práci na pracoviště dynamické termografie v laboratoři automatického měření.

Literatura

- [1] VAVŘÍČKA, Roman: Bezdotykové měření teploty [online]. ČVUT, 2007. Dostupné [17.6.2016] z: <http://www.topin.cz/download.php?idx=69043&di=7>
- [2] LYSENKO, Vladimír: Senzory neelektrických veličin 2. Díl – Detektory pro bezdotykové měření teplot, BEN technická literatura, 2005 (NTK)
- [3] FLIR SYSTEMS: Thermal imaging for electrical / mechanical diagnostics [online]. Dostupné [17.6.2016] z: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820483/T820483_EN.pdf
- [4] HELEBRANT, František, MONI, Vlastimil, BLATA, Jan: Studijní podklady – TERMOGRAFIE [online]. VŠB TU Ostrava, 2010. Dostupné [17.6.2016] z: http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/1studijni-podklady-termografie-196.docx
- [5] SOVA, Jan, KADLEC, Karel: Termokamery a pyrometry – princip měření, vlastnosti a využití [online]. All For Power, 2014. Dostupné [17.6.2016] z: http://www.workswell.cz/wp-content/uploads/2014_1_AFP_1.pdf
- [6] CENTRUM TERMOGRAFIE: Parametry termokamery [online]. Dostupné [17.6.2016] z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/parametry-termokamery/>
- [7] IBARRA CASTANEDO, Clémente: Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase. Université Laval, 2007.“
- [8] FLIR SYSTEMS, <http://www.flir.com/automation/display/?id=56341>
- [9] FLIR SYSTEMS, <http://www.flir.com/instruments/display/?id=54865>
- [10] VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKA, Metody identifikace [online]. VŠB TU Ostrava. Dostupné [17.6.2016] z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/identifikace/str/metody.htm#ma12

Seznam obrázků

1. Obrázek 1: Poloha infračerveného spektra <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
2. Obrázek 2: Vyzařovací charakteristika černého tělesa v závislosti na teplotě <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
3. Obrázek 3. Absolutně černé těleso http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/1studijni-podklady-termografie-196.docx
4. Obrázek 4: Intenzita vyzařování různých typů zářičů <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
5. Obrázek 5. Blokové schéma termokamery <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
6. Obrázek 6. Monitorování elektrických součástí http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820483/T820483_EN.pdf
7. Obrázek 7. Detekce úniku tepla z potrubí http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820483/T820483_EN.pdf
8. Obrázek 8. Monitorování ohřevu elektromotoru http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820483/T820483_EN.pdf
9. Obrázek 9. Princip aktivní termografie <http://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/irndt/aktivni-termografie>
10. Obrázek 10. Závislost časového průběhu teplotního kontrastu na hloubce defektu http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/1studijni-podklady-termografie-196.docx
11. Obrázek 11. Zjištění fází pomocí korelací čtyřmi body Vlastní zdroj
12. Obrázek 12. Termokamera FLIR A5 <http://www.flir.com/automation/display/?id=56341>
13. Obrázek 13. Stroboskop EUROLITE SUPERSTROBE 2700 <http://eshop.steinigke.de/de/mpn52202174-eurolite-superstrobe-2700.html>
14. Obrázek 15. Uspořádání otvorů na zkušební vzorku Vlastní zdroj
15. Zkušební vzorek Vlastní zdroj
16. Zkušební vzorek Vlastní zdroj
17. Termografické pracoviště v laboratoři automatického řízení Vlastní zdroj
18. Obrázek 18. Uspořádání termografického pracoviště – (1) osobní počítač, (2) termokamera, (3) zkušební vzorek, (4) zdroj tepla
19. Obrázek 19. Termogram povrchu měřené oblasti před začátkem ohřevu Vlastní zdroj
20. Obrázek 20. Termogram povrchu před začátkem ohřevu Vlastní zdroj

21. Obrázek 21. Termogram povrchu po uplynutí 60 sekund od začátku ohřevu
Vlastní zdroj
22. Obrázek 22 Termogram povrchu po uplynutí 90 sekund od začátku Vlastní zdroj
23. Obrázek 23. Termogram povrchu po uplynutí 2 minut 30 sekund od začátku
Vlastní zdroj
24. Obrázek 24. Termogram povrchu po uplynutí 3 minut 30 sekund od začátku
Vlastní zdroj
25. Obrázek 25. Průběh teploty v místech nad defekty Vlastní zdroj
26. Obrázek 26. Průběh teploty v místech nad defekty Vlastní zdroj
27. Obrázek 27. Přechodová charakteristika soustavy s dopravním
zpožděním http://195.178.94.43/CAAC_PHP/CAAC/cesky/identifikace/apr_1r/s_01_PCH.gif
28. Obrázek 28. Měřicí karta LabJack U3-HV <https://labjack.com/products/u3>
29. Obrázek 29. Schéma zapojení ovládacích prvků reflektoru a větracího
motoru Vlastní zdroj
30. Obrázek 30. Uživatelské rozhraní programu Thermo Control Panel. Vlastní
zdroj

Seznam příloh

1. Exec.rar – spustitelná aplikace Thermo Control Panel
2. ThermoControlPanel.rar – zdrojový kód programu Thermo Control Panel