

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH**  
**ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA**

Studijní program: **B4131 Zemědělství**  
Studijní obor: **Zemědělská technika; obchod, servis a služby**  
Katedra: **Zemědělské dopravní a manipulační techniky**  
Vedoucí katedry: **doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Kontrola technického stavu mechanizačních prostředků pomocí  
termokamery**

Autor: **Vladimír Halíř**  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.**  
Konzultant práce: **Ing. Josef Frolík, CSc.**

České Budějovice, 2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vladimír HALÍŘ**  
Osobní číslo: **Z12914**  
Studijní program: **B4131 Zemědělství**  
Studijní obor: **Zemědělská technika: obchod, servis a služby**  
Název tématu: **Kontrola technického stavu mechanizačních prostředků pomocí termokamery**  
Zadávací katedra: **Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky**

**Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :**

Cílem práce je prověřit možnosti využití tepelného záření jako indikátoru stupně opotřebení, a nebo možného zdroje poruch při provozu strojů a zařízení v zemědělských provozech.

1. Tepelné záření a jeho vlnová délka.
2. Základní principy zachycení a záznamu tepelného záření v přenosných snímačích - termokamerách.
3. Závislost mezi teplotou a stupněm zatížení a opotřebení především ložisek a ozubených soukolí.
4. Metodický postup při sledování jednotlivých součástí a následné vyhodnocování naměřených hodnot.
5. Modelový postup měření a zpracování sledovaných součástí u zvoleného stroje nebo zařízení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

Kreidl, M.: Měření teploty : Senzory a měřicí obvody. BEN - technická literatura, 1. vyd. Praha, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4;  
Čech, B.: Měření teplot v energetice. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1. vyd. Ostrava, 2008. 60 s. ISBN 978-80-248-1861-0;  
Šimko, M., Chupáč, M.: Termovízia a jej využitie v praxi. EDIS, 1. vyd., Žilinská univerzita v Žilíně, 2007. 110 s. ISBN 978-80-8070-654-8;  
<http://www.termovize.com/>  
<http://www.termovize-mereni.cz>  
<http://cs.wikipedia.org>

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.  
Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky  
Konzultant bakalářské práce: Ing. Josef Frolík, CSc.  
Katedra zemědělské dopravní a manipulační techniky  
Datum zadání bakalářské práce: 15. ledna 2014  
Termín odevzdání bakalářské práce: 15. dubna 2016

  
prof. Ing. Miloš Šech, CSc., dr. h. c.  
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA  
Katedra zemědělské  
dopravní a manipulační techniky  
Budovatelů 1168, 370 05 České Budějovice

  
doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 12. listopadu 2015

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to - v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou - elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č.111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

.....  
Datum

.....  
Podpis studenta

## **Abstrakt**

Cílem této práce bylo prověření využití tepelného záření objektů pro oblast bezkontaktní diagnostiky zemědělských strojů. Metodu bezkontaktního snímání teplotních polí lze realizovat pomocí speciálního přístroje. Tento měřicí přístroj se nazývá termokamera. Termokamery obecně umožňují zachytit radiační teplo objektů ve svém zorném poli a přenést jej do podoby tzv. termosnímku. Pořízený termosnímek je tepelným obrazem snímaných objektů, které se takto projevují do svého okolí v oblasti infračerveného spektra elektromagnetického vlnění. Pro uživatele jsou pak tyto hodnoty záření zobrazeny v barvách viditelného spektra, které korespondují s určitou povrchovou teplotou objektu.

V oblasti zemědělské techniky je metoda využitelná tam, kde je předpoklad zvýšeného tření a jeho přeměna na ztrátové teplo. Abnormálnímu nárůstu provozní teploty pak lze přisuzovat různou hodnotu závažnosti a využít ji jako indikátoru stupně opotřebení pro možný budoucí stav výskytu poruch.

Výsledkem práce je souhrnný popis faktorů, které svým působením ovlivňují technické parametry strojních součástí. Dále jsou v práci uvedeny zásady pro správné pořizování termogramů a postupy pro jejich vhodné vyhodnocování. Praktickým měřením jsou tyto teoretické předpoklady prověřeny pro použití při běžné provozní diagnostice strojů a jejich součástí.

## **Klíčová slova**

Tepelné záření; bezkontaktní diagnostika; termovize; technický stav; opotřebení; ložiska.

## **Summary**

Main topic of this research is possibility of use the infra-red radiation of materials for purpose of machine diagnosis in agricultur machinery. Non-contact method of temperature monitoring is possible with special camera called infravision camera. With this device is possible to scan surface temperature of monitored object. Output of this scan is called thermogram. For users are values of scan then shown in false colors that are corresponding with a surface temperature of an object.

In agricultur machinery the use is where the prerequisite for high increasing friction is converted into heat. Abnormal increase in the operating temperature can then be attributed to different severity of value and used as an indicator of the degree of wear for a possible future state of failures.

The result of this research is a summary description of the factors that influence its impact on technical parameters of machine parts. The principles for the proper capture of thermal images, so-called thermograms, and procedures appropriate for their evaluation are described to. Theoretical assumptions are practically tested for the use at normal operating diagnostics of machines and their components.

## **Key words**

Infra-red radiation; contactless diagnostics; thermography; technical condition; technical defect; bearings.

<b>1 Úvod</b>	9
<b>2 Úvod do problematiky</b>	10
<b>2.1 Elektromagnetické záření</b>	10
2.1.1 Tepelné záření	10
<b>2.2 Vlnová délka</b>	11
<b>2.3 Vnitřní energie tělesa</b>	11
2.3.1 Teplo	12
2.3.2 Teplota	12
2.3.3 Teplotní stupnice	12
<b>2.4 Přenos vnitřní energie</b>	13
<b>2.5 Emisivita a absorptance</b>	13
2.5.1 Dokonale černé těleso	15
2.5.2 Stanovení emisivity v praxi	16
<b>2.6 Aplikované fyzikální zákony v termografii</b>	16
2.6.1 Stefan-Boltzmannův zákon	16
2.6.2 Wienův posunovací zákon	17
2.6.3 Planckův vyzařovací zákon	17
<b>2.7 Vznětlivost materiálů</b>	18
<b>3 Úvod do termografie</b>	20
<b>3.1 Termografie</b>	20
<b>3.2 Termokamery</b>	20
<b>3.3 Konstrukce termokamery</b>	20
3.3.1 Optika termokamery	22
3.3.2 Detektory záření	22
3.3.3 Mikrobolometrické pole	23
<b>3.4 Základní parametry termokamer</b>	24
3.4.1 Teplotní citlivost	24
3.4.2 Teplotní rozsah	24
3.4.3 Spektrální rozsah (citlivost)	24
3.4.4 Přesnost stanovení teploty	25
3.4.5 Optické rozlišení, možnosti ostření a vyměnitelné objektivy	25
3.4.6 Doplnkové a nadstandardní funkce a vybavení	26
<b>3.5 Termografická měření</b>	26

<b>4 Předměty sledování</b>	29
<b>4.1 Provozní spolehlivost stojírenských výrobků</b>	30
4.1.1 Definice opotřebení a jeho charakteristiky	30
4.1.2 Fyzický život funkčních ploch v proměnných provozních podmínkách	31
4.1.3 Formy projevu poruch	32
<b>4.2 Druhy ložisek a jejich vlastnosti</b>	33
4.2.1 Valivá ložiska	34
4.2.2 Kluzná ložiska	37
<b>5 Metodika měření</b>	40
<b>5.1 Teoretický úvod do měření</b>	40
<b>5.2 Stanovení cíle měření</b>	40
<b>5.3 Modelový metodický postup měření</b>	41
<b>5.4 Očekávané výsledky a jejich vyhodnocení</b>	42
<b>5.5 Hodnocení a úprava metodického postupu</b>	42
<b>5.6 Demonstrační příklady použití termokamery</b>	43
5.6.1 Pasivní rotační pracovní orgány pro zpracování půdy	44
5.6.2 Uložení pojezdových kol	46
5.6.3 Samochodné stroje	47
<b>6 Vlastní měření a vyhodnocení dat</b>	48
<b>6.1 Naměřené hodnoty</b>	48
6.1.1 Válce	48
6.1.2 Šrotovník	49
6.1.3 Secí zařízení pro obilniny (pšenice)	50
6.1.4 Řezačka	51
6.1.5 Sklízecí mlátička	52



<b>6.2 Vyhodnocení naměřených dat</b>	54
6.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků válců	54
6.2.2 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků šrotovníku obilí	55
6.2.3 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků secích strojů	56
6.2.4 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků řezačky	57
6.2.5 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků sklízecích mlátiček	58
6.2.6 Vyhodnocení termogramů doplňkového měření provedeného na sklízecí mlátičce (Fortschritt E 512), diskovém podmítači a lisu na slámu	62
<b>7 Závěr</b>	65
<b>8 Seznam literatury a internetových zdrojů</b>	66

**Příloha: Vybrané termogramy sledovaných částí zemědělských strojů**



## 1 Úvod

V praxi se dnes termovize běžně využívá pro zjišťování například tepelných úniků budov. Tato bezkontaktní metoda snímání rozložení teplotních polí na povrchu těles se však postupně stává čím dál více používanou diagnostickou metodou nejen ve stavebnictví, ale i pro diagnostiku elektroinstalací a v dalších průmyslových odvětvích. Nejnovější termokamery jsou stále velmi drahým diagnostickým zařízením, i přesto si na trhu nachází čím dál větší uplatnění a jejich přínos pro diagnostické odvětví zdaleka není vyčerpán. Princip snímání vychází z fyzikálních zákonů o elektromagnetickém vlnění resp. tepelném záření těles, které po nástupu moderních technologií umožňuje toto záření snímat a zaznamenávat pro následnou analýzu.

Cílem této práce je prověření možností využití termovize v odvětví zemědělské výroby pro diagnostiku zemědělských strojů. Pro tento účel budou jako předměty sledování vybrány jednodušší strojní součásti - ložiska a převody - u kterých bude prověřena možnost využití termokamery pro diagnostiku jejich technického stavu v závislosti na jejich povrchové teplotě.

## 2 Úvod do problematiky

### 2.1 Elektromagnetické záření

Hmotný objekt se projevuje do svého okolí různým silovým působením a vyzařováním fotonů. Každý hmotný objekt je zdrojem elektromagnetického záření a navíc může také záření odrážet, pohlcovat a propouštět. Generované elektromagnetické záření se šíří prostředím rychlostí  $c_0$ , která je závislá na druhu prostředí. Rychlost šíření záření ve vakuu má hodnotu:

$$c_0 = (2,99792458 \pm 0,000000012) \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \quad (2.1)$$

Elektromagnetické spektrum zahrnuje spektrum všech možných vlnových délek. Elektromagnetické záření o vlnové délce  $\lambda$  (ve vakuu) má frekvenci  $f$  a jemu připisovaný foton má energii  $E$ . Vztah mezi nimi vyjadřují následující rovnice:

$$\lambda = c_0 \cdot f^{-1} \quad (2.2)$$

$$E = h \cdot f \quad (2.3)$$

kde  $c_0$  je rychlost světla a  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  je Planckova konstanta.<sup>[1]</sup>

#### 2.1.1 Tepelné záření

Speciálním případem elektromagnetického vlnění je tzv. tepelné záření, které se může šířit vakuem a je závislé na teplotě tělesa. Všechna tělesa emitují v infračerveném vlnovém pásmu elektromagnetickou energii v podobě fotonů. V obecném smyslu je tepelné záření shodné se sáláním, tedy vyzařováním celého elektromagnetického spektra. Z termodynamického hlediska jde o tepelný přenos při všech vlnových délkách. Záření není veličinou, jen volným označením děje nebo jeho výsledku, tedy např. veličiny zvané zářivý tok (měřenou ve wattech [W]), nebo jejího úhrnu za danou dobu, tedy tepla.

Při vyzařování tepelného záření tělesem se jeho vnitřní energie zmenší o energii vyslaného tepelného záření. Vnitřní energie tělesa, na které dopadá tepelné záření, se přitom zvětší o energii pohlceného záření. Při dopadu tepelného záření na těleso mohou nastat v podstatě tři případy. Tepelné záření látkou tělesa prochází, odráží se od povrchu tělesa nebo je tělesem pohlcováno. Energie tepelného záření závisí na několika faktorech, jako je teplota tělesa, barva a struktura povrchu či velikost zářivé plochy.<sup>[2]</sup>

## 2.2 Vlnová délka

Vlnová délka je vzdálenost ve směru šíření periodické vlny mezi nejbližšími dvěma body vyznačujícími se stejnou fází. Značí se  $\lambda$  a základní jednotkou je [m]. Jelikož elektromagnetické záření má vlnový charakter, je možné definovat jeho vlnovou délku.

Dle vlnové délky lze rozlišovat různé typy elektromagnetického záření viz tabulka:

název vlnění	frekvence $f$	vlnová délka $\lambda$
extrémně dlouhé vlny	0,3 – 3 kHz	$10^3 - 10^2$ km
velmi dlouhé vlny	3 – 30 kHz	$10^2 - 10$ km
dlouhé vlny	30 – 300 kHz	10 – 1 km
střední vlny	0,3 – 3 MHz	1 – 0,1 km
krátké vlny	3 – 30 MHz	100 – 10 m
velmi krátké vlny	30 – 300 MHz	10 – 1 m
ultra krátké vlny	0,3 – 3 GHz	1 – 0,1 m
mikrovlny	3 – 30 GHz	100 – 10 mm
mikrovlny	30 – 300 GHz	10 – 1 mm
infračervené záření	$10^{10} - 10^{14}$ Hz	1 mm – 1 $\mu$ m
viditelné záření	$10^{14}$ Hz	900 – 400 nm
ultrafialové záření	$10^{14} - 10^{16}$ Hz	400 – 10 nm
rentgenové záření	$10^{16} - 10^{19}$ Hz	10 – 0,1 nm
gama záření	$10^{19} - 10^{24}$ Hz	$10^{-10} - 10^{-14}$ m

**Tabulka 2.1:** Rozdělení elektromagnetických vln dle frekvence a vlnové délky

## 2.3 Vnitřní energie tělesa

Vnitřní energie tělesa je součet kinetických energií neuspořádaného pohybu částic tvořících těleso a jejich vzájemných potenciálních energií.

Změna vnitřní energie může nastat :

**a) konáním mechanické práce** (např. stlačování plynu v pístu, nepružný ráz, tření, apod.) Při těchto dějích se zvětšuje potenciální energie částic, mění se vzdálenosti mezi částicemi, proto se mění i potenciální energie částic.

**b) tepelnou výměnou** (např. ohřev užitkové vody, tepelné výměníky- chladiče, apod.) Tepelná výměna je děj, při kterém pohybující se částice jednoho tělesa narážejí na pohybující se částice druhého tělesa a předávají si energii. Tepelná výměna probíhá pouze mezi tělesy, která mají různou teplotu.

### 2.3.1 Teplo

Teplo je fyzikální dějová veličina udávající množství vnitřní energie, kterou předalo teplejší těleso studenějšímu při tepelné výměně za určitou dobu. Závisí na rozdílu teplot, hmotnosti tělesa a látky, ze které je těleso zhotoveno. Teplo je popisující termodynamický děj (posloupnost stavů systému), nikoliv veličinou stavovou, popisující stav jediný. Značíme  $Q$  a základní jednotkou je Joul [J].<sup>[3]</sup>

### 2.3.2 Teplota

Teplota je stavová veličina udávající energii, která připadá na jednu částici tělesa. Charakterizuje tepelný stav tělesa a je důsledkem průměrné rychlosti neuspořádaného pohybu částic. Charakterizuje, zda látka při tepelném kontaktu s jinou látkou bude či nebude v tepelné rovnováze (zda bude či nebude přijímat nebo předávat teplo). Teplotu můžeme přiřazovat, jak vyplývá i z uvedené definice, jen určité látce.<sup>[4]</sup>

### 2.3.3 Teplotní stupnice

Při měření teploty se používají teplotní stupnice. Základní stupnicí je termodynamická teplotní stupnice, která má za počátek nejnižší možnou teplotu - absolutní (teplotní) nulu. Jednotkou je kelvin [K], základní jednotka SI. Absolutní nula je definována základním referenčním bodem, kterým je trojný bod vody (jediná teplota, při které se samotná voda vyskytuje současně ve všech třech skupenstvích - led, voda, sytá vodní pára):  $T = 0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$ . V běžné praxi se používá Celsiova (teplotní) stupnice, která má jednotku [°C]. ( $1 \text{ °C} = 1 \text{ K}$ ). Stupnice však mají různé počátky:  $0 \text{ °C}$  odpovídá  $273,15 \text{ K}$ . Stupeň Celsia vznikl historicky jako 1/100 rozpětí mezi bodem tuhnutí a bodem varu vody. Termodynamickou teplotu je zvykem označovat  $T \text{ [K]}$  a Celsiovu teplotu  $t \text{ [°C]}$ . Relace pro převod dané teploty mezi těmito teplotními stupnicemi je<sup>[4]</sup>:

$$T = T_0 + t = 273,15 + t \quad (2.4)$$

## 2.4 Přenos vnitřní energie

Ohřívá-li se studenější těleso (nebo jeho část) od teplejšího, může k tomu docházet třemi různými způsoby:

**a) vedením** – částice spolu přímo sousedí, předávají si svou kinetickou energii,

**b) prouděním** – látka se pohybuje a předává svou energii,

**c) zářením** – látka vyzařuje elektromagnetické záření (při běžných teplotách infračervené), dopadá-li záření na jinou látku, zahřívá ji.

## 2.5 Emisivita a absorptance povrchů

Emisivita je definovaná jako poměr intenzity vyzařování šedého tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Emisivita tak určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. Je to bezrozměrná veličina.

Emisivita obecně pro daný povrch není konstantní, ale ovlivňuje ji řada parametrů, např.:

- úhel odklonu záření od normály povrchu,
- teplota objektu,
- vlnová délka záření,
- stav povrchu,
- typ materiálu tělesa.

Tělesa, pro něž můžeme (z praktického hlediska) emisivitu považovat za nezávislou na frekvenci záření, nazýváme šedé zářiče. U tzv. selektivních zářičů uvažujeme, že emisivita je funkcí frekvence záření. Emisivita absolutně černého tělesa  $\epsilon$  má hodnotu 1. Emisivita reálného tělesa  $\epsilon_T$  nabývá hodnot  $\epsilon_T \leq 1$ .

Emisivitu lze tedy chápat jako efektivitu vyzařování. Nejvyšší emisivita je u tzv. černého tělesa, což je těleso, které pohlcuje veškeré na něj dopadající záření. U reálného tělesa je emisivita vždy menší než jedna. V praxi to znamená, že takové těleso při stejné povrchové teplotě, jako má černé těleso, vyzáří méně tepelného záření. Považujeme-li emisivitu za konstantní, tj. nezávislou na vlnové délce, hovoříme pak o tzv. šedém tělese. Ve skutečnosti je ale emisivita vždy závislá na vlnové délce záření a všechny reálné předměty jsou tzv. selektivní zářiče. <sup>[5,6]</sup>

Existují tři jevy, které se u reálných objektů projevují :

- a) část dopadajícího záření může být pohlcena,
- b) část záření může být odražena,
- c) část záření může tělesem prostoupit.

Vedle pohltivosti  $\alpha$  a emisivity  $\varepsilon$  jsou definovány i odrazivost  $\rho$  jako míra schopnosti odrážet záření, a propustnost  $\tau$  jako míra schopnosti propustit záření. Všechny tyto veličiny jsou obecně závislé na vlnové délce. Pro šedá tělesa je však můžeme považovat za konstantní v dosti široké oblasti vlnových délek. Protože jsou tyto veličiny pro bezdotykové měření teploty velmi důležité, jsou dále uvedeny jejich slovní definice:

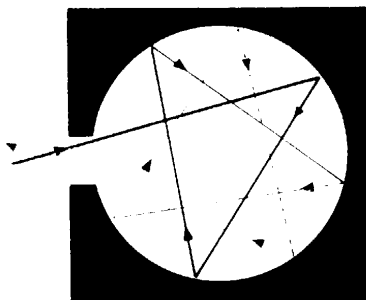
- emisivita  $\varepsilon$  je poměr zářivého toku reálného objektu a černého tělesa při stejné teplotě.
- pohltivost (absorptance)  $\alpha$  je poměr pohlceného a dopadajícího zářivého toku.
- odrazivost (reflektance)  $\rho$  je poměr odraženého a dopadajícího zářivého toku.
- propustnost (transmitance)  $\tau$  je poměr prostupujícího a dopadajícího zářivého toku.

Součet pohltivosti nebo emisivity s odrazivostí a propustností je vždy roven jedné:  $\alpha + \rho + \tau = 1$ , nebo  $\varepsilon + \rho + \tau = 1$ . Pro nepropustné materiály je propustnost  $\tau = 0$ , a pak platí:  $\varepsilon + \rho = 1$ . Ze známé emisivity můžeme vypočítat odrazivost nepropustného tělesa:  $\rho = 1 - \varepsilon$ . Čím nižší bude emisivita, tím vyšší bude odrazivost tělesa. Podrobné tabulky emisivit pro různé materiály, vlnové délky a teploty je možno nalézt v odborné literatuře, případně na internetu. Tabulka by měla obsahovat i údaj o teplotě a vlnové délce, neboť emisivita je na teplotě a vlnové délce závislá. Emisivita je velmi důležitým faktorem termografie a její vliv je nutno vždy respektovat. <sup>[5,6]</sup>



### 2.5.1 Dokonale černé těleso

Kromě vyzařování záření může každé těleso záření také odrážet, propouštět a pohlcovat. Pohlcené záření se mění zejména na tepelnou energii. Množství pohlceného záření závisí na vlastnostech tělesa, zejména na barvě (černá tělesa pohltní více záření než bílá) a na povrchové úpravě (od lesklých těles se záření odráží, kdežto matná tělesa záření více pohlcují).



**Obr. 2.1** Schématické znázornění absolutně černého tělesa <sup>[7]</sup>

Pro popis těchto vlastností těles byl zaveden určitý model tělesa – absolutně černé těleso. Je to takové myšlené těleso, které pohltní veškeré dopadající záření. Můžeme si jej představit jako dutinu s velmi malým otvorem. Jestliže záření projde malým otvorem do dutiny, jejíž vnitřní povrch je černý a matný, pak se po několika odrazech pohltní – tzn., že se malý otvor navenek jeví jako absolutně černé těleso – veškeré záření projde otvorem dovnitř, ale žádné záření otvorem nevyjde ven. Pojem dokonale černé těleso se používá jak pro tělesa dokonale pohlcující záření, tak pro tělesa dokonale vyzařující záření. V tepelné rovnováze je objekt tak dokonalým zářičem, jak dokáže záření pohlcovat. Toto je slovní formulace 2. Kirchhoffova zákona. Proto emisivita povrchu  $\epsilon$  je rovna absorptanci povrchu  $\alpha$ . V tepelné rovnováze tedy platí  $\epsilon = \alpha$ .

Reálná černá tělesa lze použít jako:

- kalibrační zdroje záření, např. pro kalibraci bezkontaktních čidel měření teploty (infradetektorů, pyrometrů, termovizních kamer),
- referenční zdroje záření, např. ve vysokoteplotních metodách měření emisivity materiálů.

### **2.5.2 Stanovení emisivity v praxi**

I když existuje celá řada metod jak stanovit emisivitu určitého povrchu, jsou často vhodné pouze pro měření v laboratoři se speciálním vybavením. Pro měření v terénu jsou doporučovány dvě velmi podobné metody. Kontaktní metoda a metoda využívající materiál s referenční emisivitou. Obě metody vycházejí ze stejné úvahy. Při stanovení emisivity termokamerou je třeba znát skutečnou hodnotu teploty povrchu. Ta je v případě kontaktní metody stanovena dotykovým teploměrem. V případě metody využívající materiál s referenční emisivitou je na povrch měřeného objektu nanesen tento materiál (nejčastěji jde o nátěr či vhodnou lepicí pásku) a následně je pomocí termokamery stanovena jeho teplota. Bez změny polohy termokamery se mění nastavení hodnoty emisivity v termokameře tak, aby teplota vyhodnocená termokamerou byla stejná, jako teplota změřená kontaktně či na materiálu s referenční emisivitou. Před provedením uvedeného postupu je třeba nejprve korigovat vliv zdánlivé odražené teploty. <sup>[6,8]</sup>

## **2.6 Aplikované fyzikální zákony v termografii**

Pro bezkontaktní snímání teploty povrchů těles je využíváno několika fyzikálních jevů a zákonů, které toto měření umožňují. Většina těchto zákonů je značně složitá a pro obsah této práce příliš rozsáhlá. Proto zde jsou uvedeny pouze krátké slovní definice, které pro tento účel postačí.

### **2.6.1 Stefan-Boltzmannův zákon**

Pokud známe emisivitu předmětu, který je zdrojem záření, a známe jeho teplotu v Kelvinech a velikost povrchu v metrech čtverečných, můžeme spočítat vyzářený výkon ve Watech pomocí Stefan-Boltzmannova zákona, který je dán součtem energií vyzářovaných tělesem na všech vlnových délkách.

### 2.6.2 Wienův posunovací zákon

Se změnou povrchové teploty objektu se nemění jen intenzita vyzařování, jak říká výše zmíněný Stefan-Boltzmannův zákon, ale také spektrální rozložení vyzařovaného výkonu. S rostoucí teplotou se maximální intenzita vyzařování posouvá směrem ke kratším vlnovým délkám podle tzv. Wienova posunovacího zákona.

### 2.6.3 Planckův vyzařovací zákon

Tepelné záření těles popsal plně až Max Planck. Stanovuje, kolik energie těleso vyzáří na jednotlivých vlnových délkách. Pro černé těleso ( $\varepsilon = 1$ ) je tato spektrální závislost funkcí pouze povrchové teploty. Intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou povrchové teploty tělesa.

Zdroje elektromagnetického záření vyzařují svou energii po kvantech. Na základě kvantové teorie a v souladu se zákony pravděpodobnosti odvodil Planck svůj vyzařovací zákon, který konstatuje:

Záření o frekvenci  $f$  může být vyzařováno, nebo pohlcováno jen po kvantech energie (1.4). Z uvedené formulace Planckova vyzařovacího zákona je možné pro dokonale černé těleso (dokonalý zářič) ve vakuu odvodit vztah pro spektrální hustotu zářivého toku dokonale černého tělesa  $E_{ol}$  jako funkci vlnové délky záření  $\lambda$  a teploty zářiče  $T$ .

## 2.7 Vznětlivost materiálů

Pro účel vyhodnocení termovizního měření je dále definováno několik pojmů v souvislosti s vznětlivostí vybraných materiálů, se kterými mohou zemědělské stroje přicházet do přímého kontaktu.

**Vznětlivost** je definována jako schopnost materiálů zapálit se při zahřívání za zvýšených teplot. Vyjadřuje se teplotou vzplanutí a teplotou vznícení.

**Teplota vznícení** je definována jako nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde k samostatnému zapálení vzorku nebo produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje, projevujícího se plamenem nebo výbuchem.

**Teplota vzplanutí** je definována jako nejnižší teplota vzduchu proudícího kolem vzorku, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plyných produktů rozkladu vzorku, ten však dále nehoří.

**Teplota hoření** je definována jako nejnižší teplota hořlavé látky, při níž se tvoří dostatečné množství hořlavých par, které se při přiblížení otevřeného plamene vznítí a samy dále hoří.

**Teplota samovznícení** je definována jako nejnižší teplota, při které začínají v látce (bez vnějšího zdroje tepla) probíhat exotermické pochody, které vedou k samovznícení. Teplo potřebné pro zapálení látky vzniká při rozkladu samotné látky v důsledku chemických, fyzikálních a biologických procesů.

**Teplota žhnutí** je definována jako nejnižší teplota tuhé látky, při níž dochází ke žhnutí bez přítomnosti otevřeného plamene. Ke žhnutí dochází často u jemných sypkých materiálů a prachů. Dochází zde k zapálení směsi plyných zplodin vzniklých při rozkladu látky a vzduchu. Zdrojem vznícení mohou být volné horké plochy, kde teplota žhnutí je závislá na vrstvě prachu.

**Oblast výbušnosti** je definována jako oblast koncentrací směsi plynu, par nebo prachu se vzduchem, ve které směs při zapálení zdrojem vznícení vybuchuje. Hoření se dále samo šíří s velkou rychlostí. Mezní koncentrace (v objemových procentech nebo v  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  vzduchu za normálního atmosferického tlaku) oblasti výbušnosti se označují jako dolní (nejnižší koncentrace hořlavé látky) a horní (nejvyšší koncentrace hořlavé látky) mez výbušnosti. Čím je oblast výbušnosti širší (velké rozmezí dolní a horní hranice výbušnosti), tím je látka nebezpečnější a riziko výbuchu nebo požáru vyšší. <sup>[9]</sup>

V zemědělství se často setkáváme s dobře hořlavými materiály, kde riziko požáru nastává právě při manipulaci s nimi (sklizeň, skladování). V této souvislosti jsou nejčastěji zmiňovány pevné látky rostlinného původu, tj. sláma, seno a obilný prach. Při mechanizované sklizni se tyto látky dostávají do přímého kontaktu se stroji a jejich strojními součástmi, které mohou při pracovním nasazení vykazovat značně zvýšené provozní teploty v důsledku klimatických podmínek a technického stavu. Za těchto podmínek mohou vznikat tzv. hybridní směsi, ve kterých stoupá výbušnost prachů pod dolní mez koncentrace výbušnosti jednotlivých komponentů směsi. Nebezpečnost takové směsi je ovlivněna jemností prachových zrn, množstvím rozvířeného prachu, koncentrací kyslíku v prostoru, teplotou a pohybem směsi (turbulence, proudění, víření). V souvislosti s prachovzdušnými směsmi se uvádí pojem minimální iniciační energie, která udává minimální energii jiskry nutnou pro zapálení směsi. V praxi může toto jiskření nastat u zemědělských strojů v důsledku elektrostatického náboje nebo při kontaktu pohyblivých částí stroje s příměsmi nerostného původu. V následující tabulce jsou uvedeny teploty vznícení vybraných materiálů, se kterými se v zemědělství setkáváme velmi často.<sup>[10]</sup>

**Tabulka 2.1:** Teploty vznětlivosti vybraných materiálů

materiál	teplota vznícení $t_{vz}$ [°C]	teplota samovznícení $t_{svz}$ [°C]	teplota žhnutí $t_{zh}$ [°C]	teplota hoření $t_{hoř}$ [°C]
seno	233	70	204	204
sláma	310	80	210	200
obilný prach	267	-	-	-

## 3 Úvod do termografie

### 3.1 Termografie

Mezi moderní metody analýzy zářivých toků, resp. měření teplot povrchů, patří infračervená termografie. Je to obor zabývající se rozbořem teplotního pole na povrchu tělesa a to bezkontaktním způsobem. Úkolem termografie je analýza infračervené energie vyzařované tělesem. Termografickým měřicím systémem lze zobrazit teplotní pole měřeného objektu, pouze však na jeho povrchu. Obor termografie se v širším měřítku rozvinul společně s rozšířením infračervených kamer, pro které se obecně vžilo slovní spojení termovizní kamera. <sup>[6,11,12]</sup>

### 3.2 Termokamery

Termokamera pracuje na principu bezdotykového měření teploty, a princip funkce je tedy stejný jako u infračerveného teploměru. Zásadní rozdíl je v tom, že zatímco infračervený teploměr měří teplotu v jednom bodě (přesněji určuje průměrnou teplotu v určité oblasti), termokamera určuje rozložení teploty (teplotní pole) na povrchu větších částí, popř. i celých objektů. Původní systémy byly velmi složité a pracovaly s rozkladem obrazu do jednotlivých bodů. Většina současných typů termokamer, činných v rozmezí vlnových délek od 8 do 14  $\mu\text{m}$ , pracuje bez rozkladu obrazu a využívá tzv. maticové (mozaikové) detektory. Zatímco v infračerveném teploměru je použit jeden senzor záření, v termokameře je instalován maticový detektor obsahující velký počet jednotlivých senzorů tepelného záření. <sup>[6,11,12]</sup>

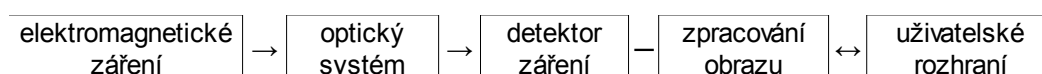
### 3.3 Konstrukce termokamery

Vstupní optická část termokamery se podobá digitálnímu fotoaparátu. Objektiv termokamery však musí propouštět infračervené záření, a proto je vyroben z germania. Objektiv promítá dopadající tepelné záření na maticový detektor, na kterém se vytváří „infračervený obraz“ povrchu měřeného objektu.

Moderní mikrobolometrické detektory obsahují již na čipu potřebné signálové obvody pro analogovou nebo digitální úpravu signálu. Řídící logika zajišťuje postupné čtení signálu z jednotlivých prvků. Signály z jednotlivých senzorů maticového detektoru, které odpovídají zářivému toku IČ záření jednotlivých měřených bodů, jsou zpracovány v elektronických obvodech, jejichž výstupem je nakonec viditelný barevný obraz na monitoru termokamery. <sup>[6,11,12]</sup>

Hlavními komponenty infračervené termokamery jsou:

- germaniová optika,
- maticový detektor s předzesilovačem (se stabilizovanou teplotou nebo chlazený),
- elektronické obvody řízené mikroprocesorem pro zpracování signálů a obrazů,
- pomocné senzory a akční členy pro řízení termokamery,
- uživatelské rozhraní s ovládacími prvky, monitorem a rozhraním pro komunikaci s PC.



**Obr. 3.1:** Blokové schéma základních částí termokamery

Blokové schéma termokamery můžeme rozdělit na tyto tři části:

- optika,
- detektor,
- elektronika pro zpracování a prezentaci obrazu.

Uvedené blokové schéma termokamery je zjednodušené a nezahrnuje všechny prvky a funkce využívané v moderních termokamerách. Například v průběhu práce s termokamerou lze slyšet zvuk „cvaknutí“ uvnitř termokamery a na displeji se objeví nápis: kalibrace. Nejde však o teplotní kalibraci termokamery, ale o mikroprocesorem řízenou korekci převodních charakteristik jednotlivých mikrobolometrů (funkce *Non-Uniformity Correction* – NUC). Tato korekce se dělá proto, že při ozáření detektoru není rozložení teploty na jeho povrchu zcela homogenní. Systém vkládá před detektor na krátký okamžik clonu simulující homogenní zářič s velkou emisivitou a poté nastavuje převodní charakteristiky jednotlivých senzorů na stejnou hodnotu. Teplota maticového detektoru je udržována na konstantní hodnotě (obvykle 30 °C) obvodem s Peltierovým článkem.<sup>[6,11,12]</sup>

### 3.3.1 Optika termokamery

Optika termokamer je v současné době tvořena spojkou z germánia bez možnosti optického zoomu. Zákony optiky jsou stejné jako třeba u skleněné čočky, liší se pouze použitý materiál. Na povrchu čočky je navíc nanесena antireflexivní vrstva, která zabráňuje odrazu infračerveného záření na povrchu čočky. Dochází tak ke zvýšení její propustnosti až na 90 % i více. Optika funguje zároveň jako filtr. Na povrch čočky dopadá elektromagnetické záření všech vlnových délek a optika propouští jen záření požadovaných vlnových délek v určitém rozmezí.<sup>[6,11,12]</sup>

### 3.3.2 Detektory záření

Z hlediska principu funkce rozlišujeme dva základní typy detektorů:

- a) selektivní fotonové detektory,
- b) neselektivní tepelné (odporové) detektory.

#### Tepelné detektory

tepelné detektory fungují na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího infračerveného záření. Příkladem je tzv. mikrobolometr, který mění elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření (dopadajícím zářením se ohřívá). Tzv. mikrobolometrické pole, což je velké množství mikrobolometrů rozmístěných do 2D pole, je dnes nejčastějším typem detektoru u termokamer a setkáme se s ním ve většině konstrukcí.<sup>[13]</sup>

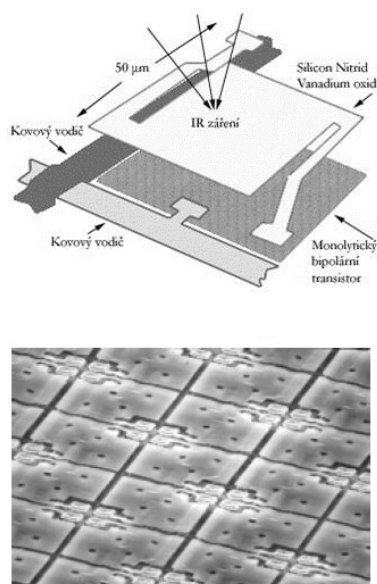
#### Fotonové detektory

Fotonové detektory využívají principu tzv. fotoelektrického jevu. Polovodičové detektory zaznamenávají jednotlivá kvanta (fotony) záření. Fotonové detektory využívají přímé přeměny dopadajícího záření na elektrický proud (fotoelektrický jev). Velikost výstupního elektrického signálu je úměrná intenzitě dopadajícího záření. Jsou výrazně citlivější než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení. Termokamera s fotonovým detektorem je tedy mnohem těžší než s tepelným detektorem, právě z důvodu nutnosti chlazení detektoru.<sup>[13]</sup>



### 3.3.3 Mikrobolometrické pole

Mikrobolometr je typ tepelného detektoru, který mění svůj elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího infračerveného záření. Mikrobolometrické pole se skládá z řady malých detektorů (mikrobolometrů). Tento typ tepelného detektoru je v současné době u termokamer nejobvyklejší. Jedná se o termokamery s teplotní citlivostí do cca 30 mK a spektrálním rozsahem 8  $\mu\text{m}$  až 14  $\mu\text{m}$ . Dalším důležitým rozdílem mezi tepelnými a fotonovými detektory je spektrální citlivost. Zatímco tepelné detektory jsou širokopásmové, fotonové detektory jsou úzkopásmové a jsou schopny detekovat záření jen v úzkém rozsahu vlnových délek. V infračervených termokamerách se v současné době nejčastěji používají mikrobolometrické maticové detektory. Výjimkou jsou speciální, avšak velmi drahé termokamery pro výzkumné účely, v nichž se pro zvýšení citlivosti a rychlosti měření používají fotonové detektory. Rozlišení maticového detektoru je dáno počtem prvků (senzorů, obrazových bodů, popř. pixelů) v matici. Matice detektorů pro méně výkonné termokamery obsahují např. 100  $\times$  100 prvků, detektory běžných termokamer 320  $\times$  240 prvků a termokamery vyšší kvality pracují s rozlišením např. 640  $\times$  480 (i více) prvků.



**Obr. 3.2:** Konstrukce mikrobolometrického pole <sup>[6]</sup>

## 3.4 Základní parametry termokamer

### 3.4.1 Teplotní citlivost

Teplotní citlivost termokamery je vyjádřena pomocí parametru NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*) což je nejmenší teplotní rozdíl, který vyvolá signál větší, než je vlastní šum systému. V praxi to znamená, že rozdíl teplot na povrchu objektu musí být dostatečný, aby vytvořil rozdílový signál, který je větší, než vlastní šum systému (termokamery). NETD se udává ve stupních Celsia [°C] či v Kelvinech [K] a vyjadřuje, jaké nejmenší teplotní rozdíly je na povrchu černého tělesa termokamera schopna zaznamenat. V současné době je obvyklá hodnota 100 mK u základních modelů a až 15 mK u nejcitlivějších termokamer.

Citlivost podstatným způsobem ovlivňuje kvalitu výsledného snímku. Čím větší je hodnota parametru NETD (tj. čím menší je teplotní citlivost), tím více jsou termogramy „zašuměné“. Při stanovení požadavku na teplotní citlivost termokamery je zapotřebí rozmyslet si, jaké objekty a jaké detaily je potřeba měřit. Dnes je standardem teplotní citlivost 50 mK, která poskytuje dostatečnou hodnotu pro většinu aplikací. Jak vypadá vlastní šum termokamery, bychom se dozvěděli, kdybychom zapnuli termokameru a zabránili jakémukoli záření v rozsahu vlnových délek, v němž je termokamera citlivá (v jejím spektrálním rozsahu), aby dopadalo na detektor. Tento vlastní šum je přičten k „čistému“ obrazu a čím je menší teplotní citlivost termokamery, tj. čím je větší NETD, tím více je výsledný obraz zašuměn.<sup>[6,11,12]</sup>

### 3.4.2 Teplotní rozsah

Teplotní rozsah termokamery udává, jakou nejnižší a jakou nejvyšší teplotu je termokamera schopna změřit. Řada termokamer má několik měřicích rozsahů.

V současné době lze pomocí termokamer bezdotykově měřit teploty v rozsahu hodnot od - 40 °C až do + 3000 °C.<sup>[6,11,12]</sup>

### 3.4.3 Spektrální rozsah (citlivost)

Spektrální rozsah kamery je rozsah vlnových délek, v rámci kterých je termokamera citlivá, tj. rozsah vlnových délek, v němž termokamera zaznamenává infračervené záření. Spektrální rozsah termokamer s tepelným detektorem je téměř výhradně 8 μm až 14 μm, termokamery s fotonovým detektorem mohou měřit v jiném rozsahu vlnových délek.<sup>[6,11,12]</sup>

### 3.4.4 Přesnost stanovení teploty

Přesnost stanovení měřené teploty je ovlivněna vlastní chybou termokamery, která je pevně daná a metodikou měření ji nelze snížit. V praxi je tedy výsledná chyba měření vždy větší, neboť i další parametry jsou stanoveny s určitou nejistotou (emisivita), nebo nelze přesně stanovit jejich vliv (odražená zdánlivá teplota).

Přesnost stanovení teploty je u termokamer udávána  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  % z změřeného údaje, přičemž platí údaj, který je horší. Nejpřesnější termokamery jsou schopny měřit s přesností  $\pm 1$  °C nebo  $\pm 1$  %. Tuto nejistotu stanovení teploty je třeba vždy uvažovat při interpretacích výsledku měření. Tedy při naměření teploty 20 °C s termokamerou s přesností stanovení teploty  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  % je výsledná hodnota  $20$  °C  $\pm 2$  °C. Pokud naměříme stejnou termokamerou teplotu 200 °C, bude výsledek měření  $200$  °C  $\pm 4$  °C (2 % z 200 °C jsou 4 °C, což je více než 2 °C). <sup>[6,11,12]</sup>

### 3.4.5 Optické rozlišení, možnosti ostření a vyměnitelné objektivy

Optika (čočka) promítá infračervené záření na tzv. detektor. Ten se skládá z mnoha tzv. pixelů, což jsou samostatné detektory, které převádějí dopadající infračervené záření na elektrický signál a následně na teplotu. Počet pixelů výsledného obrazu je pak dán právě počtem pixelů tohoto detektoru. V současné době se u termokamer setkáme běžně s rozlišením: 60×60, 80×80, 120×120, 160×120, 240×180, 320×240, 640×480 a 1024×768, výjimkou ale nejsou i jiná rozlišení. Jak velká část prostoru bude na detektor promítnuta, ovlivňuje zorné pole objektivu. Zorné pole je část prostoru, který je objektiv schopen zachytit a který následně promítne na detektor infračervého záření. Zorné pole se měří ve stupních rovinného úhlu a může být odlišné pro vertikální i horizontální směr. Čím větší je úhel zorného pole, tím větší část prostoru je promítnuta na detektor a tím menší detaily jsou detektorem zachyceny. <sup>[6,11,12]</sup>

### 3.4.6 Doplnkové a nadstandardní funkce a vybavení

Vlastnosti jako robustnost konstrukčního provedení, odolnost proti vlivům vnějšího okolí, výdrž akumulátorové baterie, snadné ovládání, nízká hmotnost atd. a vybavení jako např. přenosné polstrované pouzdro, napájecí adaptér, náhradní akumulátorová baterie, kalibrační lepicí páska, sluneční clona, kabel USB mini, SD karta a další je bráno jako standard. Ovšem softwarové vybavení, zvláště pak termokamer vyšších tříd, je mnohem zajímavější. Od základních funkcí jako je volba jazyka, prohlížení snímků, editace popisku, datumu a času, apod. se dnes setkáváme se značně sofistikovanějšími programy.

Zde stojí za zmínku pohyblivé kurzory měření teploty, audio a vizuální alarm, sledování nejteplejšího/nejstudenějšího bodu, propojení obrazů (termo a vizuální), měření teploty každého pixelu, editace obrázků (hlasové a textové komentáře), sekvenční a vysokorychlostní snímkování, záznam radiometrického videa, kompatibilita a bezdrátový přenos do PC nebo chytrých telefonů. Funkce MSX (*Multi Spectral Dynamic Imaging*) je multispektrální zobrazení snímků, kdy jsou jasně viditelné hrany objektů, snímky jsou ostřejší a tím umožňují přehlednější orientaci. Funkce ULTRAMAX je technologie zpracování obrazu, která umožňuje vytvářet snímky, které mají čtyřikrát více pixelů a o 50 % méně šumu. <sup>[6,11,12]</sup>

### 3.5 Termografická měření

Termokamera je moderní měřicí přístroj, který je ve většině případů schopen kvantitativně měřit povrchovou teplotu objektů. Pro správné používání této techniky je zapotřebí znát technické vlastnosti termokamery, vlivy působící na výstupní signál z detektoru a způsoby, jak získat z termogramu užitečné informace. Faktorů, které mohou ovlivnit výsledek měření a interpretaci termogramů, je velmi mnoho. Při termografickém měření snímá termokamera záření nejen samotného objektu, ale také záření z okolí, které se odráží z povrchu objektu do kamery.

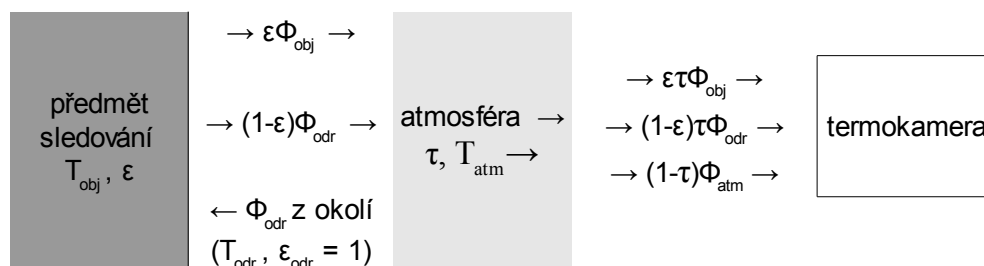
Celková situace je schematicky znázorněna níže, kde jednotlivé složky zářivého toku přijaté detektorem termokamery jsou následující (za předpokladu úplné transparentnosti optiky termokamery a zanedbatelného zářivého toku optických komponent):

- zářivý tok z objektu  $\Phi_{obj}$  zeslabený průchodem atmosférou  $\varepsilon\tau\Phi_{obj}$

-odražený zářivý tok z okolních zdrojů  $\Phi_{odr}$  zeslabený průchodem atmosférou:

$(1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr}$ , kde  $(1 - \varepsilon)$  vyjadřuje odrazivost objektu. Předpokládá se, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu  $\varepsilon_{odr} = 1$  a stejnou teplotu  $T_{odr}$ ; tzv. zdánlivá odražená teplota  $T_{odr}$  je zdánlivá teplota jiných objektů, jejichž záření se odráží od povrchu měřeného objektu do kamery.

- zářivý tok emitovaný atmosférou je dán vzorcem:  $(1 - \tau)\Phi_{atm}$ , kde  $(1 - \tau)$  vyjadřuje emisivitu atmosféry s teplotou  $T_{atm}$  a propustností  $\tau$ .



**Obr. 3.3:** Schéma působících vlivů na termografické měření teploty

Lze tedy sestavit rovnici pro výpočet celkového zářivého toku  $\Phi_{celk}$  dopadajícího na detektor termokamery:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr} + (1 - \tau)\Phi_{atm} \quad (2.5)$$

Po zjednodušení spočívajícím v zanedbání vyzařování atmosféry a detektoru termokamery se dostane vztah:

$$\Phi_{celk} = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr} \quad (2.6)$$

Výraz  $\varepsilon\tau\Phi_{obj}$  ve vztahu reprezentuje zářivý tok z objektu, jehož povrchovou teplotu je třeba určit, zatímco výraz  $(1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr}$  představuje parazitní zářivý tok dopadající na detektor, jehož vliv je třeba korigovat.

Uvažujeme-li, že termokamera používá tepelné senzory, které přijímají záření v širokém spektru vlnových délek, lze odvodit vztah pro výpočet teploty povrchu měřeného objektu, podle kterého mikroprocesor termokamery vypočítává teplotu pro jednotlivé detekční prvky maticového detektoru.

Pro úplný výpočet však musí uživatel termokamery zadat parametry měření: emisivitu objektu  $\varepsilon$ , zdánlivou odraženou teplotu  $T_{odr}$ , teplotu atmosféry  $T_{atm}$  a propustnost atmosféry  $\tau$  (místo propustnosti atmosféry se obvykle zadává relativní vlhkost a vzdálenost kamery od objektu). Parametry měření jsou u termokamery předem nastaveny na určité hodnoty, takže pro správné určení měřené teploty je nutné hodnoty těchto parametrů korigovat podle skutečné situace. Každá měřicí termokamera by tudíž měla být vybavena možností korekce hodnot těchto parametrů.

Důležité je zejména správné nastavení emisivity, protože jakákoliv změna emisivity měřeného objektu nebo pozadí vyžaduje korekci naměřené radiční energie pro všechny pixely detektoru kamery. Správné nastavení emisivity má významný vliv na správnost měření. Význam přesné korekce roste s klesající emisivitou objektu (resp. s rostoucí odrazivostí).

Správným nastavením zdánlivé odražené teploty se koriguje tepelné záření z okolí, které se odráží od měřeného objektu a dopadá na detektor termokamery. Vliv zdánlivé odražené teploty je tím větší, čím větší je odrazivost povrchu. Naopak čím větší je emisivita, tím je vliv zdánlivé odražené teploty menší. Přesná termografická měření vyžadují pokud možno přesnou znalost parametru  $T_{odr}$ . Při vyšších hodnotách emisivity (0,95 a více) postačí  $T_{odr}$  stanovit přibližně (např. odhadem a na základě zkušeností).<sup>[14]</sup>

Nejzásadnější zdroje chyb jsou způsobeny těmito faktory:

- nastavenou hodnotou emisivity,
- zdánlivou odraženou teplotou,
- vlastním vyzařováním a útlumem atmosféry,
- chyby způsobené obsluhou (volba nevhodné měřicí techniky, prováděním měření za nevhodných podmínek, špatná interpretace naměřených dat).

## 4 Předměty sledování

Při jakémkoliv zkoumání, sledování nebo analýzách prováděných pro různé účely je především třeba stanovit a definovat předmět zkoumání. V oboru provozní spolehlivosti je pro předměty zkoumání vžit termín označení strojírenský výrobek. Pod tímto pojmem si lze představit stroje, přístroje a zařízení strojírenské výroby různé složitosti, které můžeme dále rozčlenit na dílčí prvky s různým funkčním posláním a různou konstrukční složitostí.

Za základní část strojírenského výrobku je považována strojní součást, zhotovená bez montážní operace. Zpravidla se vyrábí z jednoho druhu materiálu tvářením nebo obráběním a zakomponovává se do montážního celku. Jako montážní celek výrobku se označují podskupiny, skupiny, hlavní skupiny, stroje, strojní zařízení a strojní linky. K součástem se počítají i odlitky, valivá ložiska, lana, řetězy, spínače, ložiskové pánve s výstélkou, ozubená kola převodů aj.

Z hlediska vlastní činnosti je možno u součásti rozlišit zpravidla vždy několik funkčních ploch. Tím je myšlena aktivní část strojní součásti, která přichází do styku buď s funkční plochou jiné součásti, nebo se zpracovávaným materiálem. Strojní součást může mít i několik funkčních ploch např. dosedací plocha pro ložisko, pro těsnicí kroužek, drážková část hřídele, ozubení apod. V oboru provozní spolehlivosti je právě funkční plocha elementárním prvkem předmětu zkoumání. Její stav se bezprostředně odráží na kvalitě práce stroje, jeho výkonu, hospodárnosti provozu apod. Pro funkční plochy se určují údaje o přípustných hodnotách opotřebení a jich se také zpravidla týkají opravárenské a údržbářské zásahy.<sup>[15,16]</sup>

## 4.1 Provozní spolehlivost stojírenských výrobků

Pro účel kontroly technického stavu mechanizačních prostředků je definování provozní spolehlivosti jednou z užitných vlastostí, která se mimo jiné významně podílí i na úrovni celkové jakosti stroje. Spolehlivost stojírenského výrobku se chápe jako jeho obecná vlastnost či schopnost plnit po stanovenou dobu požadované funkce při zachování provozních parametrů daných technickými podmínkami. V současnosti se spolehlivost chápe jako komplexní vlastnost každého výrobku, utvářena množinou dílčích spolehlivostních vlastností.<sup>[15]</sup> Mezi nejdůležitější zde řadíme:

- a) bezporuchovost,
- b) životnost,
- c) udržovatelnost,
- d) opravitelnost,
- e) skladovatelnost,
- f) pohotovost,
- g) diagnostikovatelnost.

### 4.1.1 Definice opotřebení a jeho charakteristiky

Uvažujeme-li o opotřebení jako o složitém fyzikálně-chemickém procesu, je možné ho více specifikovat za pomoci podmínek ve kterých probíhá. Proces opotřebení je ovlivněn především charakteristikami :

- opotřebovávaných a opotřebovávajících těles,
- opotřebovávajícího média,
- vzájemného relativního pohybu,
- zatížení,
- prostředí, ve kterém děj opotřebení probíhá.

Při analýze procesu opotřebení je pro praktické užití výhodné vyšetřovat a sledovat časový průběh opotřebení a výsledky průběžně hodnotit z grafického zobrazení záznamu průběhu. Běžně mají být tímto postupem zachyceny vedlejší jevy opotřebení, jako velikost, forma, zbarvení součástí a pro účel sledování termokamerou změna teploty.



Strojní součást, chápána jako základní opotřebovávané těleso, je vždy těleso tuhé, vyznačující se svou formou, hmotou, jakostí povrchu a jeho stavem, a také druhem, tvrdostí a strukturou základního materiálu, ze kterého je součást tvořena.<sup>[15,16]</sup>

Při relativním pohybu strojních součástí má tento pohyb tři základní charakteristiky:

- a) kluzný pohyb,
- b) valivý pohyb,
- c) ráz.

Směr pohybu opotřebovávané součásti a opotřebovávajícího média je uvažován jako:

- a) rovnoběžný,
- b) kolmý,
- c) šikmý.

#### **4.1.2 Fyzický život funkčních ploch v proměnných provozních podmínkách**

Hlavními činiteli proměnných provozních podmínek jsou změny v zatížení stroje, různá kvalita a zkušenosti obsluhy, různá kvalita technické údržby a klimatické podmínky, ve kterých je stroj využíván. Některé vlivy působí náhodně, a tak je nelze zcela diferencovat a jasně vymezit. Z proměnlivých parametrů působících činitelů lze vyvodit závěr, který má vliv na problematiku provozní spolehlivosti strojů. Rychlost opotřebení jednotlivých součástí stroje pracujícího v proměnlivých provozních podmínkách se během provozu velmi často mění. Z toho plyne, že průběh opotřebení v čase není lineárního charakteru. Proto ve většině případů nelze pro určitou jednotlivou strojní součást dopředu přesně stanovit délku jejího technického života. I u zdánlivě shodných součástí se objevuje rozdílnost v dosažené délce technického života v důsledku variabilních provozních podmínek, ale i výrobních vlivů.<sup>[15,16]</sup>

### 4.1.3 Formy projevu poruch

Poruchy se v zásadě projevují ve dvou základních formách:

**a) postupně narůstající defekt**, který je zákonitým důsledkem doby provozu stroje (opotřebení, otláčení, únavový lom apod.) nebo kalendářním stářím stroje (koroze, degradace a stárnutí materiálu),

**b) náhlý defekt nahodilého charakteru**, který je důsledkem působení náhodných příčin přetížení či neovlivnitelných vnějších vlivů.

Postupný defekt má z hlediska výskytu u strojních součástí největší četnost. Ve většině případů se projevuje na opotřebení funkčních ploch. Opotřebení, jakožto úbytek materiálu z funkčních ploch je nevyhnutelným následkem tření, které způsobuje změnu vůlí ve spojeních, zeslabuje se příčný průřez součástí, mění se vlastnosti styčných ploch, otupují se břity apod. V tomto směru je opotřebení základním strukturálním parametrem přímo vyjadřující technický stav funkční plochy ve formě geometrického tvaru, jeho rozměrů a vůlí apod. Na velikosti strukturálních parametrů je závislá hodnota diagnostických parametrů funkčních ploch, které se projevují ve formě jiných závislých veličin například tlaku, napětí, frekvence, el. odporu, výkonu, spotřeby, teploty apod.

I když postupné defekty způsobené opotřebením a jejich vliv na životnost a bezporuchovost funkčních ploch jsou nejčastější a nejvýznamnější, nelze opomenout další kategorii významně ovlivňující technický život funkčních ploch v provozu, a to náhlé poruchy s nahodilým charakterem projevu. Specifikum těchto poruch je, že jejich vznik v dnešní době ve většině případů nelze nijak diagnosticky sledovat. Příkladem by mohly být poruchy způsobené skrytými chybami výroby; lomy, trhliny a deformace součástí vlivem náhodného přetížení způsobeného buď chybou obsluhy nebo náhodným ztížením provozních podmínek; lomy, trhliny a deformace součástí způsobené neadekvátní technickou údržbou apod.<sup>[15,16]</sup>

## 4.2 Druhy ložisek a jejich vlastnosti

Dnes se prakticky na jakémkoliv zemědělském stroji setkáme s tímto strojním prvkem. Ložiskem se rozumí takové vzájemné uspořádání strojních součástí, které umožňuje jejich relativní pohyb, který je buď rotační, lineární nebo kývavý. Funkční spolehlivost strojů, tedy jejich bezpečnost, náklady na provoz a údržbu, životnost apod. je značně závislá na konstrukčním řešení, montáži, kvalitě výroby a spolehlivosti mazání ložisek.

Nevyhnutelným jevem, který provází jakýkoliv pohyb, je tření. U ložisek je cílem toto tření minimalizovat tak, aby ztracený výkon v něm byl co nejmenší. Ztrátový výkon se z největší části přeměňuje na teplo, které by mohlo být diagnostickým signálem při termovizním měření. Pro adekvátní vyhodnocení tepelných ztrát v ložiscích budou dále popsány jejich základní parametry, rozdělení a vlastnosti.

Pro tento účel rozlišujeme dva druhy tření, z jehož fyzikální podstaty vyplývají dvě základní skupiny ložisek:

- a) valivá ložiska,
- b) kluzná ložiska.

### 4.2.1 Valivá ložiska

Valivá ložiska přenáší zatížení, které na ně při provozu působí prostřednictvím valivých tělísek. Tato tělíska, různého tvaru a uspořádání, se odvalují téměř bez skluzu a i při rozběhu stroje je tření velmi malé. Valivé ložisko je dnes pro své široké využití normalizovanou strojní součástí. V základním provedení se valivé ložisko sestává z těchto částí:

- vnitřní a vnější kroužek,
- valivá tělíska,
- klec,
- těsnění.

Valivá ložiska lze dělit podle několika parametrů, např.

dle přenášeného směru zatížení na:

- radiální,
- axiální,
- kombinované,
- momentové,

dle počtu řad na:

- jednořadá,
- dvouřadá,
- víceřadá,

dle tvaru valivých tělísek na:

- kuličková,
- válečková,
- kuželíková,
- soudečková,
- jehlová,

dle styku tělíska s oběžnou dráhou na ložiska s:

- bodovým stykem,
- čárovým stykem,

dle možnosti naklopení na:

- naklápěcí,
- tuhá.

Každý konstrukční typ valivého ložiska má své specifické vlastnosti, a proto je při volbě ložiska důležité znát vlastnosti pro vhodný způsob použití, a tím předejít nežádoucím jevům nadměrného opotřebování či nízké provozní spolehlivosti. V praxi je potřeba brát v úvahu i více různých vlivů a porovnávat je vzájemně při volbě ložiska z hlediska závažnosti a možných nežádoucích dopadů na strojní celek. Nejdůležitější hlediska při volbě standardního typu jsou:

- zatížení,
- prostorové nároky,
- nesouosost,
- otáčky,
- hlučnost chodu,
- tuhost,
- axiální posuvnost,
- přesnost,
- montáž a demontáž,
- těsnění.

Pro účely termovizní diagnostiky budou dále specifikována pouze některá hlediska, která svými vedlejšími projevy zapříčiňují vznik tepla. Tření v ložisku závisí na zatížení, provozních otáčkách, mazivu, typu a velikosti ložiska. Tření má potom zásadní vliv na vývin tepla v ložisku a tedy i jeho provozní teplotu.

Provozní otáčky ložisek jsou limitovány:

- vnitřní konstrukcí,
- přesností výroby,
- velikostí ložiska,
- vůli v ložisku,
- způsobem mazání,
- konstrukcí uložení, která má vliv na odvádění vznikajícího tepla z ložiska.

Mezními otáčkami ložiska jsou takové otáčky, při kterých je za daných provozních podmínek dosaženo tepelné rovnováhy mezi teplem vznikajícím v ložisku a teplem, které je z ložiska odváděno.

Na základě experimentálních zkoušek a praktických aplikací lze konstatovat, že existují maximální otáčky, které by neměly být překročeny z technických důvodů nebo z důvodu vysokých nákladů, které by si vyžádalo udržení provozní teploty chlazením na přijatelné úrovni. Pokud by ložisko mělo pracovat s vyššími otáčkami, než jsou mezní, je nutné změnit způsob mazání a odvod tepla, případně konstrukci celého ložiska. Pro vyšší otáčky se například doporučují ložiska ve vyšší přesnosti s masivní klecí vedenou na některém z ložiskových kroužků a mazání oběhem oleje nebo olejovou mlhou.

Ložiska vyznačující se nízkým koeficientem tření, a tedy i nízkým vývinem tepla, jsou vhodná pro vysoké otáčky. Těchto parametrů dosahují kuličková ložiska (tuhá i naklápací) při čistě radiálním zatížení a kuličková ložiska s kosoúhlým stykem při kombinovaném zatížení. Z konstrukčních důvodů nemohou dosahovat axiální ložiska tak vysokých otáček jako ložiska radiální.

Dalším faktorem, který ovlivňuje několik vlastností ložiska, je mazání. To má značný vliv na životnost, hlučnost a bezporuchový chod ložiska. Mazivo chrání ložisko před opotřebením, zamezením přímého kontaktu styčných ploch, korozi a částečně před přehříváním. Pro mazání se používají buď plastická maziva, nebo oleje. Při aplikaci plastických maziv je potřeba věnovat pozornost správnému množství, protože přeplnění ložiska může způsobit velmi prudký nárůst provozní teploty, zvláště toto hrozí při vysokých otáčkách. V ložiscích zatížených vysokými otáčkami nebo vysokými provozními teplotami používáme mazací olej, který lépe odvádí vznikající teplo. Pro životnost ložiska je vhodná taková konstrukce uložení, kde mazací soustava k styčným plochám přivádí čistý (filtrovaný) olej a přebytečný olej z ložiska volně odtéká.

Mluvíme-li o tzv. bezúdržbových uzavřených (utěsněných) ložiskách, tak náplň plastického maziva zabezpečuje mazání zpravidla po celou dobu trvanlivosti ložiska za normálních provozních podmínek. Ložiska v tomto provedení není možno domazávat a při poruše se vyměňuje celé.

Pokud ložisko koná jen velice pomalý rotační nebo kývavý pohyb, nebo na něj působí zatížení rázové, vychází přípustná hodnota zatížení z plastické deformace materiálu. Ta se projeví vznikem vtisků valivých tělísek do oběžných drah, které následně způsobují vibrace, zvýšení tření a hlučný chod. <sup>[15,17]</sup>

## 4.2.2 Kluzná ložiska

Kluzná ložiska pracují na principu smykového tření, které je žádoucí snižovat pomocí mazání. Tato ložiska jsou jednoduché konstrukce, tím pádem levná a snadno montovatelná. Neobsahují žádné pohyblivé části, pouze mezi ložiskový čep a náboj je vloženo měkké ložiskové pouzdro s výstélkou nebo bez ní. Velikost smykového tření závisí na několika faktorech:

- velikosti zatížení,
- vlastnostech povrchu (drsnosti),
- stávajícím opotřebením,
- kvalitě mazání,
- použitým materiálu.

Viskozitě oleje odpovídá smykové tření v kapalině a tomu též oteplování ložiska při jeho rotačním pohybu. S rostoucí teplotou klesá viskozita a pro dosažení vyrovnané tepelné bilance je nutné větší množství oleje. Proto, aby mohlo ložiskem protékat dostačující množství oleje pro ochlazování ložiska, je potřebné zvětšení ložiskové vůle. Tento požadavek má vliv na základní parametry kluzného ložiska, a to na únosnost, tuhost a tlumení. Vůle mezi čepem a pouzdrem určuje tuhost uložení. S větší vůlí tuhost klesá. Zmenšením vůle se dále zvětšuje škrticí odpor, oteplení a snižuje se průtokové množství nosné tekutiny.

V kluzných ložiskách může nastat několik druhů tření:

- suché,
- polosuché,
- kapalinné.

Vlivem tření dochází k zahřívání ložiska a tím následně k opotřebením měkkého materiálu ložiskového pouzdra. Pokud nejsou kluzné plochy ložiska mazány, dochází k tzv. suchému tření, které způsobuje nadměrné zahřívání a opotřebování a může vést až k zadření ložiska. Pokud jsou kluzné plochy mazány nedostatečně, jedná se o tzv. polosuché tření. Při polosuchém tření dochází sice k doteku vrcholů styčných kluzných ploch, ale velikost tření je zde oproti suchému tření menší. U kapalinného tření se mezi styčnými plochami kluzných ložisek vytvoří souvislá vrstva maziva. V tomto případě je vliv tření na ložisko nejmenší.<sup>[18,19]</sup>

Kluzná ložiska dělíme:

dle způsobu mazání na:

- hydrodynamická,
- hydrostatická,
- s omezeným mazáním,
- samomazná,
- samomazná s tuhými mazivy,

dle tvaru kluzné plochy na:

- válnová,
- kuželová,
- kulová,
- patní,
- prstencová,
- hřebenová.

dle směru zachycované síly na:

- radiální,
- axiální,

### **Opotřebením kluzných ložisek při kapalinném tření**

Z teorie hydrodynamického mazání víme, že kromě podmínek, které je nutno dodržet při samotné konstrukci spoje, jako např. geometrický tvar a rozměry pouzdra a čepu, vůle uložení, vlastnosti mazacího oleje (viskozita), maximální dovolené zatížení spoje, je poloha čepu v ložisku závislá prakticky jen na otáčkách. Pokud stroj není v provozu, čep má nulové otáčky a je v přímém styku s pouzdrém. Po uvedení stroje do pohybu se čep začne otáčet a zachycovat mazivo. Zachycené mazivo se začne vtlačovat do klínové mezery mezi čepem a pouzdrém ložiska a vzniká takzvaný mazací klín. Ten postupně se zvyšujícími se otáčkami nadlehčuje čep do té doby, než je dosaženo určitých jmenovitých otáček, při kterých je přerušen přímý kontakt třecích ploch čepu a pouzdra. Po dosažení těchto otáček vzniká stabilní nosná vrstva maziva mezi styčnými plochami ložiska.



V okamžiku rozběhu a zastavení stroje tedy vzniká polosuché nebo suché tření, které má na opotřebení ložiska svůj vliv. Při nulových otáčkách je přímý tlak čepu na povrch pouzdra nejvyšší. Z toho lze usuzovat, že právě při rozběhu a zastavování stroje se bude opotřebení ložiska projevovat nejvíce v důsledku nedostatečných otáček pro vytvoření nosné mazací vrstvy.

V praxi se s opotřebením v proměnlivých podmínkách provozu setkáme velmi často. Proměnlivost zatížení se může projevit ve svém důsledku na velikosti součinitele tření, produkty opotřebení nejsou plynule a beze zbytku odstraňovány z třecích ploch a mění se normálový tlak na třecích plochách. To vše má vliv na vyšší míru opotřebení v běžných provozních podmínkách. U strojních součástí určených pro práci při kapalinném tření nejsou často při běžném provozu dodrženy minimální otáčky pro vytvoření nosné mazací vrstvy. Tím se funkční plochy přímo dotýkají i v období normálního pracovního nasazení stroje (nejen při spouštění a zastavování) a dochází k opotřebení po celou dobu provozu. To má za následek znatelné snížení technického života součástí.

Protože u hydrostatického mazání ložisek nedochází za běžného provozu ke kontaktu hřídele a pouzdra, vykazují teoreticky nulové opotřebení. Jsou plně zatížitelná i při nulových otáčkách, což je zajištěno externím zdrojem tlakového média. Nosná síla ložiska není tedy závislá na viskozitě maziva ani na kluzné rychlosti, ale na tlaku mazného média přiváděného mezi hřídel a pouzdro. Tuhé uložení je zajištěno obvodově předepnutým čepem. Volbou vyhovujících parametrů lze dosáhnout vysoké energetické účinnosti. Při provozu nezáleží na smyslu kluzné rychlosti a ložiska jsou vhodná pro častý rozběh a doběh. Naproti tomu potřeba hydraulického obvodu zvyšuje pořizovací náklady, hydrostatická ložiska jsou konstrukčně složitější, i jejich údržba je komplikovanější a mohou vykazovat poměrně vysokou poruchovost. <sup>[15,18]</sup>

## **5 Metodika měření**

Měření bylo provedeno termokamerou Testo875 od firmy Testo.

### **5.1 Teoretický úvod do měření**

Při realizaci měření je vycházeno z teoretického předpokladu, že sledované zemědělské stroje, složené z mnoha mechanických funkčních částí, nejsou bezztrátové. Tedy jejich výkon je snížen o určité ztráty vznikající v různých částech stroje s různou povahou projevu. Pro účely tohoto měření termokamerou se naše pozornost bude soustředit na části strojního zařízení, kde součásti funkčního celku konají povětšinou rotační pohyb. Tyto součásti jsou uloženy v různých druzích ložisek, kde v důsledku tření mohou vznikat ztráty, které se dále projeví na opotřebení funkčních ploch součástí. Předpokládaným doprovodným jevem při zatížení strojních součástí je vznik tepla.

Vznikající teplo, šířící se radiací do okolí, bude sledováno termokamerou, ze které následně získáme vizuální obraz rozložení teplotních polí v podobě takzvaných termosnímků. Velmi důležitým krokem je správné vyhodnocení naměřených hodnot a jejich vypovídající hodnota pro účel diagnostiky technického stavu sledovaných strojů a zařízení. Tomuto požadavku musí být přizpůsoben celý postup měření. Eliminování vzniku možných chyb dle všech zásad měření termokamerou je předpokladem pro získání dat vhodných pro další zpracování, vyhodnocení a vyvození využitelných závěrů.

### **5.2 Stanovení cíle měření**

Cílem měření je prověřit možnosti využití tepelného záření jako indikátoru stupně opotřebení a nebo možného zdroje poruch strojních zařízení zemědělské techniky. Předpokladem tedy je, že z pořízených termosnímků nejvíce zatěžovaných a namáhaných součástí bude možno vyčíst rozložení teploty na povrchu a určení teploty sledovaných strojních částí. Sledována budou především uložení pohyblivých a rotačních součástí, tedy ložiska a ozubená soukolí převodů.

Pomocí hodnot z termosnímků by mělo být možné určit stupeň opotřebení a tím zajistit včasnou údržbu či výměnu a předejít tak možnému zdroji poruchy.

### 5.3 Modelový metodický postup měření

Samotné pořízení termosnímků je velmi jednoduchou a banální záležitostí. Ovšem pro pořízení kvalitního snímku s požadovanou vypovídající schopností je zapotřebí se řídit určitými pravidly, která nám toto zaručí. Tato pravidla, doporučení a postupy pro minimalizaci chyb v měření termokamerou byla již popsána v prvních dvou kapitolách této práce, proto zde bude popsán postup při polním měření na zemědělských strojích.

Traktor s agregovaným zařízením bude sledován v určitém časovém horizontu, ve kterém zvolíme dostatek menších časových úseků. Termosnímků začneme pořizovat od začátku provozu, kdy bude stroj ještě studený, až do dosažení provozní teploty, kdy by se měla teplota ustálit na určité hodnotě. Pro toto měření by bylo vhodné zabezpečit konstantní zatížení po celou dobu snímkování. Ze získaných hodnot vznikne graf závislosti teploty v čase. Z výsledné křivky bude možné vyčíst hodnotu provozní teploty sledovaných částí a její dosažení po určitém čase nasazení stroje v provozu. Takto získané hodnoty pro daný zemědělský stroj nám dále poslouží při následném měření a uspoří čas na sledování.

Pro další sledování provozního stavu není potřeba pořizovat snímky v krátkých časových intervalech, jelikož již známe přibližnou hodnotu provozní teploty a dobu, za kterou ji stroj při kontinuálním nasazení dosáhne. Za předpokladu, že po dosažení provozní teploty strojních součástí se již tato teplota prakticky nemění a zůstává konstantní po celou dobu nasazení stroje v pracovním režimu, se naše pozornost bude soustředit na sledování teplotních anomálií. Ty se mohou projevit až po delší době provozu stroje. Proto provedeme snímkování například až na konci směny těsně po ukončení prací, aby sledované části stroje nestihly vychladnout, například při jízdě zpět do zemědělského podniku po zpevněné pozemní komunikaci, kde se zatížení stroje značně sníží.

## **5.4 Očekávané výsledky a jejich vyhodnocení**

V první části měření je zemědělský stroj sledován v provozu po krátkých časových intervalech od začátku prací až do plného provozního nasazení. Od počátku snímání je předpoklad, že hodnota teploty povrchu součástí se bude pozvolna zvyšovat s časem, po který bude stroj v provozu. Tento úměrný nárůst teploty však bude pozorován pouze do určité meze. Touto mezí bude dosažení provozní teploty, ve které by se měla hodnota po nějaké době záběhu stroje ustálit. Pro různé strojní části lze očekávat různé hodnoty provozních teplot. Toto je potřeba brát v úvahu při následném vyhodnocování výsledků měření a pro tento účel stanovit kritéria závažnosti diagnostikovaných hodnot.

Další možností vyhodnocení výsledků měření je využití komparativní metody posouzení technického stavu. Při tomto postupu je vhodné zvolit takové strojní součásti, které jsou podobné nebo nejlépe stejné konstrukce umístěné na místech se srovnatelným zatížením, například uložení pracovních orgánů kombinátorů (kompaktorů), žacích mechanismů, pojezdových kol, aktivních pracovních orgánů bran (rotační brány, půdní frézy) atd. Splněním těchto podmínek lze očekávat, že provozní teplota sledovaných částí bude téměř shodná. Pokud se bude teplotní snímek lišit, lze usuzovat, že součástka s vyšší teplotou je poškozená. Při včasné identifikaci tepelné anomálie lze předcházet poruše vhodnou údržbou nebo nahrazením poškozeného dílu novým.

## **5.5 Hodnocení a úprava metodického postupu**

Výše popsané postupy a metody sledování budou pro většinu zemědělských podniků příliš časově náročné a získaná data považována za nadbytečná. Takovéto dlouhodobé sledování přichází v úvahu např. u nově založených podniků, které pořizují nové stroje. Zde má dlouhodobé termovizní sledování strojů od počátku do konce technického života své opodstatnění. V takovém podniku je možné si vytvořit celkem přesné a podrobné normativy obnovy strojních součástí a v budoucnu je při diagnostice termokamerou adekvátně využít pro úsporu nákladů na údržbu a opravy. Ve stávajících podnicích zemědělské výroby, které využívají dnes běžných metod diagnostiky, je potřeba výše popsanou metodiku pozměnit.

Podnik, který již provozuje svou činnost po nějakou dobu, jistě na svých strojích prováděl běžnou údržbu, popřípadě musel provádět výměnu některých více namáhaných součástí. Záznamy o takových úkonech by mohly být brány jako velmi cenný zdroj vstupních informací pro termovizní diagnostiku a její okamžité, ale hlavně efektivní využití v praktickém provozu. Z těchto záznamů by bylo možné vysledovat, kdy a jak probíhala údržba daných součástí, nejčastěji mazání a seřízení. Statisticky by bylo možné vyhodnotit často poruchové a provozně nespolehlivé strojní součásti a soustředit pak pozornost při termovizní diagnostice právě na tyto součásti.

Například budeme-li ze záznamů technické údržby mít informaci o tom, že na sklízecí mlátičce bylo již dvakrát měněno ložisko pohyblivé clony u rozmetače slámy, pak právě toto bude předmětem sledování.

### **Fáze upraveného metodického postupu**

Prvním předpokladem pro zaručení uspokojivé provozní spolehlivosti strojů je identifikace méně provozně spolehlivých či nadměrně zatěžovaných součástí. Toho dosáhneme buď cíleným dlouhodobým sledováním, nebo statistickým šetřením ze záznamů o preventivní údržbě a opravách. Dalším krokem bude již samotné sledování součástí, u které předpokládáme zvýšenou poruchovost nebo vysoké zatížení. V této fázi pořizujeme termosnímky a porovnáváme rozložení teplotních polí a hodnoty naměřených teplot s běžným provozním stavem součástí. Poslední fází je vytvoření závěrů, ze kterých je pozorovatel schopen vyslovit predikci, zda bude součást v bezporuchovém či provozuschopném stavu, jak dlouho v něm ještě setrvá, kdy lze očekávat poruchu, a tím tak včasnou (ne však předčasnou) výměnou, opravou či údržbou předejít vyšším provozním rizikům a ztrátám způsobených např. neočekávanými prostoji strojů.

## **5.6 Demonstrační příklady použití termokamery**

Pro modelové příklady využití termokamery, ke sledování technického stavu strojních součástí, zde bude uvedeno několik strojních zařízení, která byla za tímto účelem názornosti vybrána. Budou zde popsány teoretické úvahy, které vždy předcházejí praktickému řešení, dále strategie pozorování a komplexní vyhodnocení získaných diagnostických signálů s ohledem na všechny dostupné a racionálně využitelné informace.

### **5.6.1 Pasivní rotační pracovní orgány pro zpracování půdy (válce, diskové podmítače)**

Válce jsou důležitou součástí každého půdy zpracujícího stroje. Na trhu je dnes nepřeberné množství druhů válců s různými vlastnostmi působení na půdu, různě tvarovanými pracovními orgány atd. Všechny konstrukce však mají jeden společný strojní prvek, a tím jsou ložiska, ve kterých jsou válce uloženy a připevněny k nosnému resp. tažnému rámu. Ložiska dnes ve většině případů bývají bezúdržbová radiální kuličková, chráněná proti vnikání prachu, vody a nečistot např. speciálním labyrintovým těsnicím kroužkem. Zvláště v zemědělství, při zpracování půdy, je žádoucí precizní utěsnění, aby prach nevnikal do prostoru třecích ploch, kde by způsoboval velmi rychlé opotřebení, které by mělo za následek rapidní zkrácení provozního života součásti.

Například plné válce pro válení porostu jetele jsou uloženy na dvou místech tj. ve dvou bezúdržbových ložiskách. Z konstrukčního hlediska nejsou ložiska pod velkým radiálním zatížením. Za tohoto předpokladu můžeme uvažovat, že ztráty třením budou minimální, tedy v bezvadném stavu nebudou produkovat příliš ztrátového tepla i za plného provozního nasazení. Jelikož jsou ložiska bezúdržbová, neprovádí se tedy žádná údržba např. mazáním a technický stav je v jistém slova smyslu neznámý. Zkušená obsluha může provést subjektivní hodnocení provozuschopnosti stroje kvalifikovaným odhadem, kterým možná při protočení válců odhalí nepravidelnost chodu či hlučnost apod.

Pokud obsluha stroje údržbě nevěnuje žádnou pozornost, může dojít vlivem postupně narůstajícího defektu až ke koliznímu stavu, kdy bude stroj neschopen provozu. Dojde tedy k zadření ložiska a je nutná jeho výměna. Pokud se toto stane na poli v pracovním nasazení, stroj musí práce přerušit a dostavit se k servisu. Tím vznikají neplánované prostoje, které při pracích v zemědělství mohou mít značný vliv na provozní náklady či při nedodržení agrotechnických lhůt na výnosy.

Pro včasnou identifikaci poruchy s tendencí postupně narůstajícího defektu je termovizní sledování teploty ložiska diagnostickým signálem s vysokou vypovídací hodnotou. Pořídíme-li termovizní snímky ložisek těsně po ukončení pracovního nasazení (směny) a porovnáme-li vzájemně nejvyšší naměřené teploty, dostaneme jasný signál o stavu jednotlivých ložisek.

Zprůměrováním běžných provozních hodnot snadno identifikujeme výskyt teplotní anomálie, které lze přiřadit určitý stupeň závažnosti. Pokud se hodnoty liší řádově o jednotky stupňů Celsia (dále °C), dá se říci, že ložiska mají shodné provozní parametry a tomuto stavu nepřičítáme žádnou hodnotu závažnosti. Pokud při dalším měření zjistíme, že jedno ložisko se svou teplotou liší v řádu desítek °C, už je to pro nás signálem věnovat této součásti větší pozornost. Sledujeme-li stroj např. v horizontu jednoho měsíce a pozorujeme-li tendenci stále narůstající teploty, je tato anomálie jasným diagnostickým signálem, že v blízké době může dojít k poruše.

V zásadě máme dvě možnosti využití takto získaných informací o technickém stavu, a to buď demontovat ložisko ještě před poruchou, tím se pojistit, že pro další nasazení bude stroj opět v bezporuchovém stavu a připraven k provozu, nebo poruchu očekávat, být na ni připraveni a až se projeví, pak řešit její odstranění.

První možnost eliminuje vznik nežádoucích časových prostojů, ale můžeme se dopustit předčasného vyřazení součásti z provozu před koncem jejího technického života a zvýšit tak provozní náklady. Druhá možnost předčasné vyřazení eliminuje, ale je zde nejistota v podobě nemožnosti přesného časového určení projevu poruchy. To lze částečně kompenzovat servisní připraveností např. objednáním náhradních dílů. Dalším rizikem při tomto postupu je možnost ovlivnění činnosti ostatních navazujících či propojených strojních skupin, kdy porucha dílčí strojní součásti může vést až k havárii celého zařízení, kde budou způsobené škody značně vyšší, ve srovnání s nevyužitím plného provozního života dané strojní součásti.

U jednoduchých strojů s pasivními pracovními orgány, jako jsou válce, půdní pěchy, diskové podmiče a talířové brány, je identifikace možného místa poruchy snadná. Stroje s těmito pracovními prvky jsou konstrukčně jednoduché, bez přímé návaznosti na vyšší strojní skupiny a ložiska bývají dobře přístupná pro pořízení termosnímků. Faktem je, že u této skupiny strojů dochází k poruchám bezúdržbových ložisek velmi zřídka. Proto se v praxi nejspíš termovizní sledování této skupiny příliš nevyužije. Ovšem pro účel vyložení problematiky termovize tento praktický příklad posloužil jako modelový.

### 5.6.2 Uložení pojezdových kol (přívěsných a návěsných strojů)

Pojezdová kola slouží k pohybu prakticky všech strojů v zemědělství používaných. Ať již se jedná o energetické prostředky, tedy traktory nebo přípojná zařízení pro transport (přívěsy, návěsy), postřikovače či samochodné skízecí stroje. Režim zatížení pojezdových kol se může u jednotlivých strojů lišit. Např. pojezdová kola u půdu zpacujících strojů slouží často pouze pro nepracovní pohyb stroje, při dopravě po pozemních komunikacích na místo výkonu pracovní operace. Zde jsou kola odstavena z provozu a stroj se po pozemku (poli) pohybuje po pracovních orgánech, které současně působí na půdu žádoucím způsobem. Jiným příkladem může být návěsný postřikovač, kde jsou pojezdová kola plně zatížena jak při výkonu dané pracovní operace, tak i při nepracovních přejezdech.

Z poznatků o konstrukčním řešení daného stroje lze dále vycházet při provádění diagnostice pomocí termovize. Je předpokladem, že pojezdová kola, která jsou v trvalém zatížení, jsou více namáhána, tedy budou produkovat více ztrátového tepla vhodného pro termografické sledování. V praxi ovšem k zásadním poruchám těchto strojních součástí, tedy uložení nosných pojezdových kol, dochází jen zřídka a jsou většinou odhaleny při větších servisních prohlídkách po nebo před začátkem sezony.

Průběžné preventivní sledování termokamerou by mohlo mít význam u domazávaných strojních částí plastickými mazivy pomocí ručního mazacího lisu. V tomto případě postupuje běžná údržba dle pokynů výrobce a to v sovislosti po jaké době provozu mazivo doplnit a jaké množství. Zde může dojít k aplikaci nadměrného množství maziva, což bude mít za následek značné navýšení pracovní teploty ložiska. Pak je tedy možné, po tomto údržbářském zásahu, sledovat ložisko termokamerou v průběhu či na konci pracovní směny a z pořízených termosnímků se ujistit, na základě hodnoty provozní teploty, zda se ložisko přehřívá v důsledku přeplnění, nebo se teplota pohybuje v rozmezí provozní teploty a tedy bylo-li aplikované množství maziva správné. V takové situaci -při přeplnění- nemusí dojít okamžitě k poruše. Přebytečné mazivo se často z ložiska vytlačí samo a ztráty jsou prakticky jen v podobě vyšší spotřeby maziv. Pokud se však po odstranění přebytečného maziva hodnota provozní teploty nesníží a neustálí, je třeba hledat příčinu naopak např. v nedostatku maziva či jiné, na toto v návaznosti vzniklé příčině.



### 5.6.3 Samochodné stroje

Nejznámějšími a v dnešní době nejvíce využívanými samochodnými stroji jsou nejspíše sklízecí mlátičky, řezačky a postřikovače. Dále lze do této skupiny řadit samochodné kombinované sklízecí stroje pro sklizeň brambor, řepy, zeleniny, ovoce apod. Každý samochodný stroj je vybaven energetickou jednotkou, místem (kabinou) řízení a obsluhy, pojezdovým ústrojím a sofistikovaným zařízením realizující samotnou sklizeň, případně další procesy v závislosti na sklizené plodině (např. čištění, třídění, řezání). Modelový příklad měření bude uveden na sklízecí mlátičce pro sklizeň obilí.

Z konstrukčního hlediska se jedná o složité stroje s navzájem propojenými strojními celky, vysoce namáhanými převody a různorodými pracovními mechanismy. Nejen, že pořizovací cena těchto strojů je velmi vysoká, ale i preventivní údržba a servisní náklady při poruše nejsou zanedbatelnou finanční položkou. Z tohoto pohledu by se jevilo termovizní měření pro průběžné analyzování technického stavu jako vhodné řešení. Stroje jsou v průběhu žní v režimu značného provozního zatížení v důsledku dodržení požadovaných agrotechnických lhůt sklizně a klimatických podmínek. V praxi to znamená dlouhé pracovní nasazení strojů, prakticky nepřetržitého provozu, v prašném prostředí, v letních měsících často za vysokých atmosférických teplot. Při takových podmínkách hraje provozní stav stroje bezpochyby jednu z velmi důležitých rolí nejen pro efektivnost provozu a minimalizaci sklizňových ztrát, ale i pro bezpečnost práce.

Předmětem termovizního sledování by tedy mohla být uložení poháněných pracovních mechanismů (žací lišta, ložiska drtiče slámy, šnekového dopravníku, mláticích bubnů atd.), řemenové převody (řemeny a řemenice), napínací kladky apod. Vhodná pro sledování by byla ložiska, která se např. v průběhu prací nebo po určité době provozu domazávají ručním mazacím lisem. Monitorováním termokamerou vybraných součástí za ztížených provozních podmínek by se odhalením nepřiměřeně rychlého nárůstu provozní teploty dalo předejít poruchám jednotlivých součástí, popřípadě havárii celého stroje. Toto riziko bylo znatelné při sklizních, kdy teplota okolního vzduchu dosahovala teploty okolo 40 °C.

Cílem využití termokamery by v tomto směru mohlo být hlídání provozních teplot na stroji pod hranicí vznícení slámy a eliminovat tak značné finanční ztráty jak v podobě znehodnoceného produktu (shoření úrody na poli), tak poškození strojní techniky (shoření sklízecí mlátičky, lisu na slámu apod.).

## 6 Vlastní měření a vyhodnocení dat

Po domluvě s technickou obsluhou byly u každého stroje zvoleny předměty sledování, které byly častým předmětem údržby, provozně problémové nebo značně mechanicky namáhané a bylo by u nich stanovení provozní teploty a její sledování v souvislosti s relevantními provozními faktory žádoucí.

### 6.1 Naměřené hodnoty

#### 6.1.1 Válcce

Stroj byl složen z hlavního nosného rámu, hydraulického systému pro rozložení, pojezdových kol pro nepracovní přejezdy a tří plných válců. Každý válec je k rámu upevněn dvěma ložisky. Tato uložení budou předmětem sledování.

Měření probíhalo v časovém horizontu dvou dnů. Stroj byl v pracovním nasazení 8 až 10 hodin denně. Polní pracovní podmínky byly po celou dobu sledování velmi vyrovnané. Pracovní operace tedy probíhaly bez jakýchkoliv výkyvů zatížení a změn vnějšího pracovního prostředí. Frekvence snímání byla zvolena 2x za pracovní směnu. První snímek byl pořízen v polovině pracovního nasazení, tj. po čtyřech až pěti hodinách nepřetržitého porvozu (teplota  $t_1$  [°C]) a druhý na konci pracovní směny ihned po ukončení prací (teplota  $t_2$  [°C]).

Předmětem sledování byla bezúdržbová ložiska válců. Každý válec má dvě ložiska, tedy sledovaných míst bylo celkem šest. Z termosnímku každého ložiska byla odečtena hodnota teploty a zaznamenána do tabulky naměřených hodnot. Z těchto hodnot byla statisticky určena celková průměrná teplota ložisek ( $t_{cpr}$  [°C]) a průměrná provozní teplota ( $t_p$  [°C]). Tato tabulka hodnot dále poslouží k diagnostickému šetření a vyvozování závěrů.

**Tabulka 6.1:** Naměřené teploty ložisek válců

identifikace ložiska	1.den		2.den	
	naměřená teplota $t_1$ [°C]	naměřená teplota $t_2$ [°C]	naměřená teplota $t_1$ [°C]	naměřená teplota $t_2$ [°C]
L1	19,9	22,3	20,8	22,2
L2	20,1	22,0	21,0	21,7
L3	19,5	22,9	20,6	22,1
L4	20,0	21,6	19,7	21,3
L5	20,2	22,1	21,4	21,8
L6	19,8	21,8	21,3	22,6

## 6.1.2 Šrotovník

Sledovaný stroj pro šrotování obilí se sestával z pohonné jednotky tvořené třífázovým elektromotorem a z kladívkového šrotovacího zařízení. Propojení bylo tvořeno plochým řemenovým převodem. Hřídel s kladívky byla uložena ve dvou ložiskách. Všechny části strojního zařízení byly předmětem sledování.

Měření probíhalo ve dvou hodinových úsecích. Tento časový horizont byl zvolen na základě běžných provozních podmínek, kdy přibližně hodinu trvalo šrotování jednoho vaku obilí. Intervaly snímání byly v první hodině provozu přibližně osmi minutové pro zachycení stoupání provozní teploty. V druhé hodině sledování byly zvoleny intervaly patnáctiminutové.

Předmětem sledování byl plochý řemec a řemenice, elektromotor, jeho energetický přívod a dvě ložiska na hřídeli šrotovníku. Z termosnímků byly odečteny teploty, zaznamenány do tabulky a následně vytvořeny grafy znázorňující průběhy teplot sledovaných součástí.

**Tabulka 6.2:** Naměřené teploty na součástech šrotovníku

č. měření	$t_{\text{řemen}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{motor}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{el.přívod}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{lož.1}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{lož.2}} [^{\circ}\text{C}]$
1	23,1	21,2	-	20,8	20,7
2	26,3	22,6	-	21	22,3
3	37,4	27,5	32,2	24,1	25,9
4	33,3	27	-	24,9	27,8
5	31,8	27,2	-	25,2	28,1
6	29,9	29,5	32,6	25,8	29,4
7	30,6	31,9	-	29,1	32,1
8	30,9	31,6	-	28,5	34,3
9	30,4	36,4	35,8	28,9	34,6
10	31,7	39,8	-	29,8	35,4
11	31,9	40,9	-	31,7	37,8
12	32,3	42,7	38,4	29,6	35,6
průměrná teplota součástí	30,8	31,53	34,75	26,62	30,33

### 6.1.3 Secí zařízení pro obilniny (pšenice)

Na secím stroji, který je složen z mnoha dílčích součástí, byly sledovány ty, u kterých byl předpoklad většího provozního zatížení, tj. uložení lopatek vířivé brány a převodovka pohánějící bránu vývodovým hřídelem traktoru.

Snímkování bylo provedeno na dvou secích strojích. První byl zcela nový, v den měření uváděný do provozu. Druhý starší stroj byl již několik let v provozu. Snímkování nového stroje probíhalo v několika intervalech. Snímky byly pořízeny v sekvenci přibližně 15, 45 a 120 minut. Starší stroj byl snímkován přibližně po dvou hodinách od začátku práce, po skončení setí první den a po skončení setí druhý den. Oba dny byl stroj v provozu přibližně 6 hodin. U nového stroje byly pořízeny snímky každého uložení kypřicích lopatek, u staršího stroje nebylo jednotlivé snímkování technicky dosažitelné. Pro stanovení průměrné provozní teploty ložisek staršího stroje a pro porovnání s průměrnými provozními teplotami nového bylo však provedené snímkování k zhodnocení dostačující.

**Tabulka 6.3:** Naměřené teploty ložisek vířivé brány nového secího stroje (Lemken)

č. ložiska	$t_{15\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{45\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{120\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$
L1	48,6	54,9	71,8
L2	47,0	51,5	67,4
L3	50,8	57,8	72,8
L4	48,6	55,3	70,7
L5	49,8	56,7	74,3
L6	51,6	56,3	77,1
L7	49,7	53,1	72,3
L8	49,5	55,8	75,8
L9	46,8	50,6	68,1
L10	49,6	55,7	76,8
průměrná teplota ložisek $t_{pr} [^{\circ}\text{C}]$	49,2	54,8	72,7

**Tabulka 6.4:** Naměřené teploty převodovky nového secího stroje (Lemken)

převodovka	$t_{15\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{30\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{60\text{min}} [^{\circ}\text{C}]$
P1	52,3	56,6	87,3

**Tabulka 6.5:** Naměřené teploty ložisek vířivé brány staršího secího stroje (Kverneland)

č. ložiska	1.den		2.den
	$t_{2hod} [^{\circ}C]$	$t_{4hod} [^{\circ}C]$	$t_{7hod} [^{\circ}C]$
L1	33,4	35,3	36,0
L2	31,9	35,1	37,6
L3	34,6	37,5	38,8
L4	34,9	37,8	38,0
průměrná teplota ložisek $t_{pr} [^{\circ}C]$	33,7	36,4	37,6

**Tabulka 6.6:** Naměřené teploty převodovky staršího secího stroje (Kverneland)

převodovka	1.den		2.den
	$t_{2hod} [^{\circ}C]$	$t_{4hod} [^{\circ}C]$	$t_{7hod} [^{\circ}C]$
P2	45,2	51,1	50,5

#### 6.1.4 Řezačka

Na řezačce, jakožto na samochodném stroji složeném z mnoha strojních součástí a funkčních strojních celků, bylo nutné zvolit ke sledování pouze několik stěžejních částí pro snímkování. Toto rozhodnutí bylo provedeno nejen z důvodu časové náročnosti, ale i z důvodu technického, jelikož snímaná místa musí být pro snímkování dobře přístupná. Po domluvě s obsluhou, též provádějící základní údržbu stroje, bylo zvoleno několik předmětů sledování, kde by bylo sledování provozní teploty relevantní. Frekvence snímkování byla zvolena 30, 60, 120min. Sledována byla převodovka žacího ústrojí, vkládacích bubnů a pohon řezacího bubnu.

**Tabulka 6.7:** Naměřené teploty na vybraných částech řezačky (New Holland)

č. snímku	vkládací bubny	řezací buben	pohon žacího ústrojí
	$t_{vb} [^{\circ}C]$	$t_{rb} [^{\circ}C]$	$t_{žu} [^{\circ}C]$
1. (30min)	60,7	75,5	52,7
2. (60min)	69,1	83,1	71,1
3. (120min)	73,3	73,8	78,3
průměrná teplota součástí	67,7	74,7	67,4

### 6.1.5 Sklízecí mlátička

Sklízecí mlátička je jedním z řady hojně využívaných samohodných zemědělských strojů pro sklizeň několika druhů plodin. V období probíhajících sklizní by se měly provádět průběžné kontroly stroje a doplňování maziv. Při dodržení těchto podmínek dochází na udržovaných či novějších strojích k poruchám při polních pracích jen málo kdy. Termovizní analýza byla provedena v týdenním horizontu sledování vybraných strojních součástí v plném provozním nasazení stroje při žnových pracích.

Pro porovnání získaných výsledků bylo měření prováděno na dvou strojích rozdílného provozního stáří. Za předměty sledování byly zvoleny součásti shodné na obou strojích (žací lišta, napínací kladky řemenů) a dále ostatní přístupné strojní součásti, na kterých bylo možné pozorovat vyšší provozní teploty (ostatní řemenice, chladič, ložisko výmlatového bubnu, výfuk). Z technických důvodů neprobíhalo snímkování v pravidelných časových intervalech, ale individuálně namátkou v průřezu pracovní doby. Při podezření teplotní anomálie na sledované součásti se této začala věnovat pozornost.

**Tabulka 6.8:** Naměřené teploty napínacích kladek novější sklízecí mlátičky (Class)

č. měření	napínací kladky (Class Lexion 570)			
	$t_{k1}$ [°C]	$t_{k2}$ [°C]	$t_{k3}$ [°C]	$t_{k4}$ [°C]
1	58,6	63,7	55	50,6
2	58,2	68	66,6	55,6
3	59,5	61,8	58,5	65,4
4	62,7	64,9	63,7	63,1
5	59,2			
6	59,5			
prům.teplota kladky $t_{pr}$ [°C]	59,62	64,6	60,95	58,68

**Tbulka 6.9:** Naměřené teploty napínací kladky starší sklízecí mlátičky (Fortschritt)

č. měření	napínací kladka (Fortschritt E 512)
	$t_{ks}$ [°C]
1	64,3
2	65,7
3	67,8
4	71,2
5	94,7
6	77,3
prům.teplota kladky $t_{pr}$ [°C]	69,26

**Tabulka 6.10:** Naměřené teploty na pohonu žací lišty starší sklízecí mlátičky (Fortschritt)

smykadlo a hlavice kosy (Fortschritt E 512)			
den	čas	$t_{s1}$ [°C]	$t_{s2}$ [°C]
1	13:37:00	83,3	82,3
	15:19:00	66,7	-
2	15:57	70,1	-
	16:28	77,6	71,3
	17:17	146,8	105,5
	17:18	112,7	-
	17:20	82,3	-
	17:22	75,2	73,6
	17:24	69,9	-
	17:26	65,8	-
	17:28	59,2	59,4
	17:31	54,8	-
	17:35	49,8	-
	17:39	45,8	42,9
	18:01	70,6	73,8
	18:03	59,7	-

**Tabulka 6.11:** Naměřená teplota na pohonu nové žací lišty (Class)

hlavice kosy (Class)
$t_{prům}$ [°C]
43,4

**Tabulka 6.12:** Naměřené teploty na prstech a přidržovačích žací lišty starší sklízecí mlátičky (Fortschritt)

č. měření	$t_{p1}$ [°C]	$t_{p2}$ [°C]
1	43,5	53,6
2	48,2	50,5
3	52,2	60,4
prům. teplota přidržovače $t_{pr}$ [°C]	47,97	54,83

**Tabulka 6.13:** Naměřené teploty na prstech a přidržovačích nové žací lišty (Class)

přidržovače kosy (Class)	
$t_{prům}$ [°C]	$t_{anomálie}$ [°C]
43	52,8

## 6.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

Při hodnocení termosnímků a z nich odečítaných teplot nebylo možné postupovat dle jednotné metodiky vyhodnocování výsledků. Každý stroj a jeho strojní součásti, které byly zvoleny za předměty sledování, měly svá technická specifika, ke kterým bylo nutno přihlížet. Při praktickém měření bylo toto bráno v úvahu a byly tomu přizpůsobeny nejen postupy při měření, ale i následné hodnocení získaných termogramů. V některých případech byly diagnostikované hodnoty konzultovány přímo s obsluhou a bezprostředně při probíhajících polních pracích vyvozovány určité závěry a provozní opatření. V kapitole 6.1 byly z termogramů odečteny nejvyšší hodnoty teplot sledovaných součástí, zpracovány do formy tabulek a statisticky byly stanoveny průměrné provozní teploty součástí. Pro zvýšení vypovídací hodnoty bude v kapitole 6.2 provedeno komplexní zhodnocení dalších faktorů a následné vyvození závěrů.

### 6.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků válců

Statistické zpracování naměřených teplot z tabulky 6.1 spočívalo ve vypočtení průměrné dosažené hodnoty teploty ložisek v časovém horizontu sledování. Porovnáním těchto hodnot již získáme určitý diagnostický signál o stavu jednotlivých ložisek. Porovnáme-li např. hodnotu  $t_{pr1}$  s hodnotou  $t_{pr2}$  u ložiska L1, zjistíme, že jsou prakticky shodné. Lze tedy usoudit, že technický stav ložiska se nezměnil a je nadále provozuschopné. Ke stejnému závěru dospějeme i u ostatních sledovaných ložisek L2 až L6. Porovnáme-li celkové průměrně dosahované hodnoty teplot  $t_{cpr}$  jednotlivých ložisek v daném časovém horizontu sledování, zjistíme, že odchylky jsou opět zanedbatelné. Za tohoto předpokladu lze z těchto hodnot  $t_{cpr}$  definovat průměrnou provozní teplotu  $t_p$  použitelnou jako diagnostický signál pro všechna sledovaná ložiska na tomto stroji.

Pokud by se teplota některého ložiska od této hodnoty odchylovala, je potřeba stanovit hodnotu závažnosti této odchylky. Příliš vysoká teplotní odchylka může ovlivnit vlastnosti např. plastického maziva, které se většinou v těchto bezúdržbových ložiskách používá. To při působení vyšší než dovolené teploty ztrácí své původní vlastnosti a rozpadá se na základní složky, ze kterých je tvořeno (základový olej, zahušťovadlo, aditiva). Víceúčelové plastické mazivo pro valivá ložiska (základový olej minerální, zahušťovací prostředek lithiové mýdlo) má teplotní rozsah použití udávaný výrobcem od -20 do 130 °C.



Většina druhů vad a poškození, které se v praxi objevují, vzniká právě při selhání mazání spolu s tepelným či mechanickým přetížením ložiska. V našem případě se při měření žádné nadlimitní teplotní výchylky nevyskytly, a tak lze usuzovat, že všechna sledovaná ložiska jsou v bezporuchovém stavu a po určitý časový interval v něm setrvají.

**Tabulka 6.14:** Průměrné teploty sledovaných ložisek válců

identifikace ložiska	1.den	2.den	celková průměrná teplota ložiska $t_{cpr}$ [°C]
	průměrná teplota ložiska $t_{pr1}$ [°C]	průměrná teplota ložiska $t_{pr2}$ [°C]	
L1	21,1	21,5	21,3
L2	21,05	21,35	21,2
L3	21,2	21,35	21,28
L4	20,8	20,5	20,65
L5	21,15	21,6	21,38
L6	20,8	21,95	21,38
			průměrná provozní teplota $t_p$ [°C]
			21,2

### 6.2.2 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků šrotovníku obilí

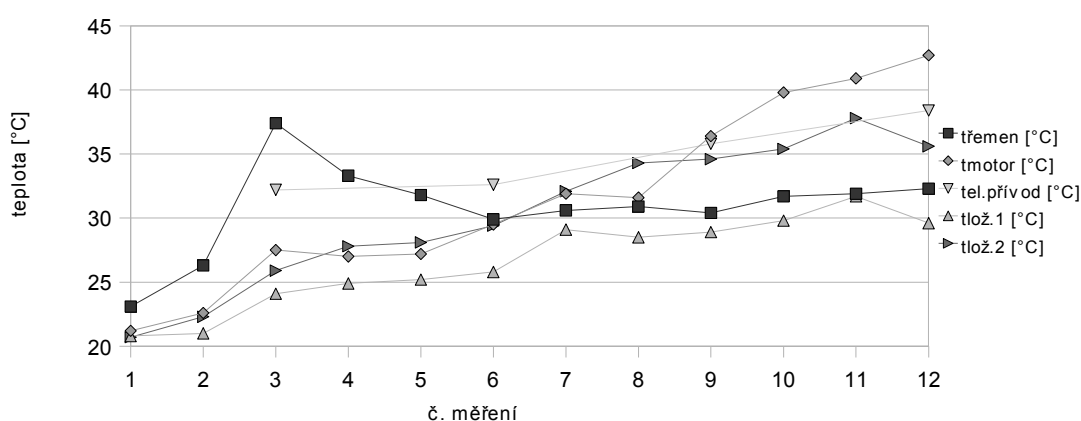
V tabulce 6.2 jsou uvedeny maximální dosahované teploty sledovaných součástí šrotovníku a je zde vypočtená i průměrná teplota dané součásti. Při grafickém znázornění těchto hodnot lze pozorovat stoupající trend teploty u všech součástí.

Nejvyšší teplotní nárůst byl zaznamenán u elektromotoru a činil  $\Delta t = 21,5$  °C. Nejvyšší naměřená teplota  $t_{motor} = 42,7$  °C byla pro tento typ točivého elektrického stroje vyhodnocena jako nekritická.

Naopak nejmenší teplotní nárůst  $\Delta t = 6,2$  °C byl zaznamenán u doplňkového měření provedného na přívodu elektrické energie k elektromotoru, kde nejvyšší naměřená hodnota byla  $t_{el,přívod} = 38,4$  °C a opět nebyla kritická. Snímkování tohoto třífázového přívodu el. energie bylo provedeno na žádost majitele z důvodu předchozího vyhoření zásuvky.

Dalšími předměty sledování byla dvě ložiska uložení hřídele s kladívky. U ložiska č.1 se očekávala zvýšená provozní teplota z důvodu drobného, okem viditelného kmitání hřídele. To se však měřením nepotvrdilo. Maximální teplota dosahovala  $t_{loz.1} = 29,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Maximální teplota druhého ložiska byla o několik stupňů vyšší  $t_{loz.2} = 35,6 \text{ } ^\circ\text{C}$  a to z důvodu návaznosti na řemenový převod. Obě ložiska byla shledána nadále za provozně schopná.

Na teplotní křivce sestavené z teplot plochého řemene zajišťujícího převod mezi elektromotorem a šrotovníkem, je patrný skokový nárůst teploty mezi snímkem č.2 a 3 o  $\Delta t = 11,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Dále však je trend klesající až na teplotu blízkou  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$  a od snímku č.6 je trend teploty mírně stoupající do maxima  $t_{remen} = 32,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Skokový nárůst teploty byl zapříčiněn přílišným naplněním násypky a přeplněním tělesa šrotovníku. Tím se zvýšil pracovní odpor, snížily se otáčky hřídele s kladívky, zvýšilo se tření mezi plochým řemenem a řemenicí a tím byl zapříčiněn nárůst teploty řemene. Po přivolání obsluhy, která snížila přísun zrna a uvolnila násypku, se stroj vyrovnal na úroveň běžných provozních otáček a teplota řemene opět klesla na průměrnou provozní teplotu.



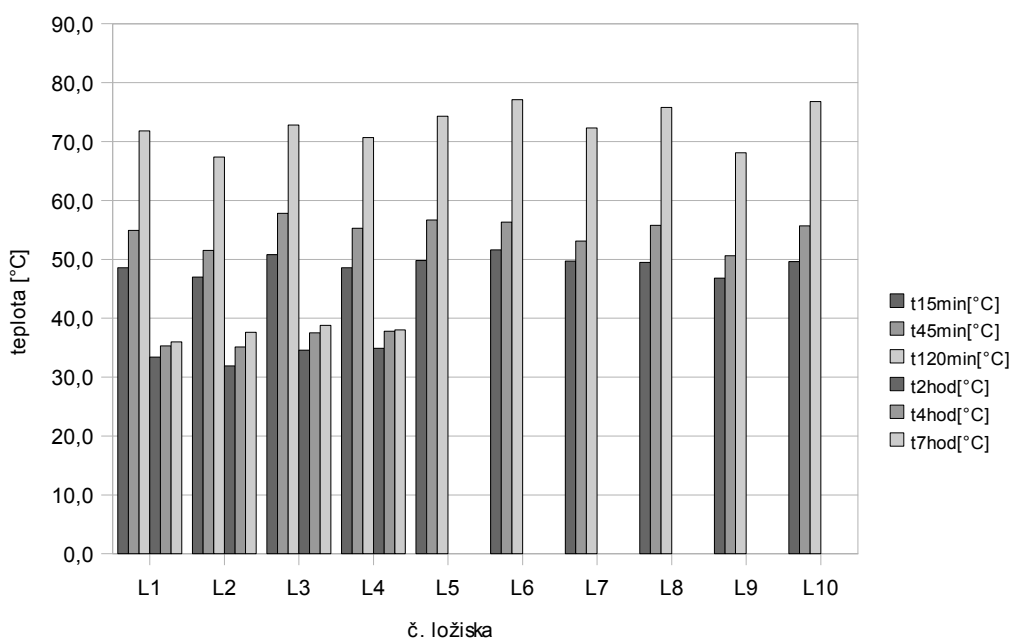
**Graf 6.1:** Vývoj teplot sledovaných součástí šrotovníku v průběhu běžného provozu

### 6.2.3 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků secích strojů

V tabulce 6.3 jsou uvedeny teploty jednotlivých ložisek uložení aktivních rotačních vidlic vířivé brány ve třech časových intervalech. Teplotní odchylka mezi jednotlivými ložisky nového secího stroje byla nejvýše  $\Delta t = 9,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Toto teplotní rozpětí nebylo považováno za nadlimitní a nebyla mu přiřazena žádná významnost. Z těchto hodnot byla vypočtena průměrná provozní teplota v každém časovém úseku. Tyto hodnoty byly vypočteny i u druhého provozně staršího secího stroje v tabulce 6.5, kde největší teplotní rozdíl ložisek byl  $\Delta t = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  hodnocen jako zanedbatelný.

Při porovnání průměrných provozních teplot obou strojů byl zaznamenán značný rozdíl hodnot. Vezmeme-li průměrnou provozní teplotu nového secího stroje po dvouhodinovém provozu  $t_{120\text{min}} = 72,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ , po které by dle kvalifikovaného odhadu obsluhy měl již stroj být zahřátý na provozní teplotu, a porovnáme-li ji s provozní teplotou staršího stroje po dvou hodinách provozu  $t_{2\text{hod}} = 33,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ , tak rozdíl mezi těmito hodnotami byl  $\Delta t = 39 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Stejný trend byl pozorován i u hodnot převodovek v tabulkách 6.4 a 6.6, kde byla stanovena  $\Delta t = 42,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Takto rozdílné teploty byly přisuzovány faktu, že nový stroj byl ve fázi tzv. záběhu, a proto vykazoval značně zvýšené hodnoty teplot. Obsluha byla o tomto informována a byla doporučena kontrola stavu a množství maziva. Zde by bylo žádoucí provést termovizní snímání po delším časovém úseku, v řádu měsíců, po ustálení provozních vlastností stroje.



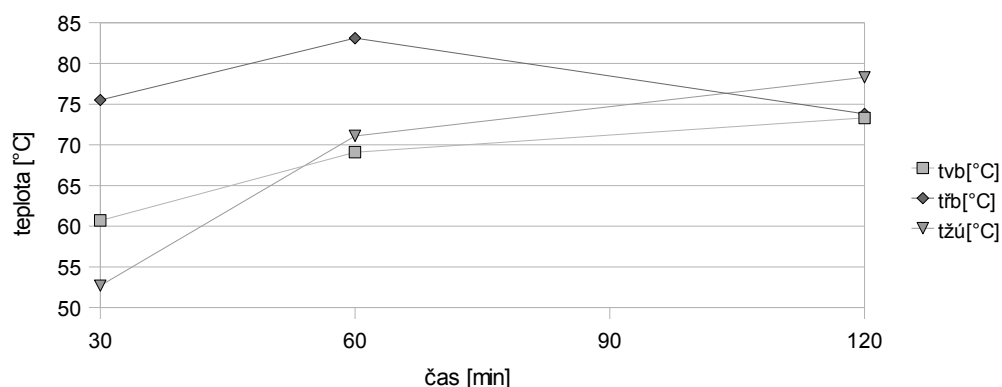
**Graf 6.2:** Porovnání provozních teplot ložisek vířivé brány dvou secích strojů

#### 6.2.4 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků řezačky

Při snímkování řezačky bylo cílem zjistit průměrné provozní teploty hlavních pracovních částí. Měření proběhlo pouze v jednom dni z důvodu, že sklízena byla pouze malá plocha kukuřice formou služeb. Proto charakter těchto hodnot je pouze informativní a nebudou z nich vyvozovány žádné provozně-technické parametry stroje.

Na doporučení obsluhy bylo provedeno snímkování pohonu žacího ústrojí, u kterého byla stanovena průměrná provozní teplota  $t_{zú} = 67,4$  °C, u ložisek vkládacích bubnů  $t_{vb} = 67,7$  °C a u ložiska řezacího bubnu  $t_{fb} = 74,7$  °C. Z grafického zobrazení je u teploty  $t_{zú}$  a  $t_{vb}$  zaznamenána stoupající tendence.

Naopak u  $t_{fb}$  byl po 60ti minutách provozu zaznamenán pokles teploty o  $\Delta t = 9,3$  °C. Tento pokles byl zajištěn zásahem aktivní mazací soustavy, který byl vyvolán signálem teplotního senzoru umístěného na ložisku. Senzor indikoval nadměrný nárůst teploty a vyslal signál do počítačové řídicí jednotky, která následně iniciovala automatické přimazání. Po doplnění maziva klesla teplota opět na průměrnou provozní teplotu.

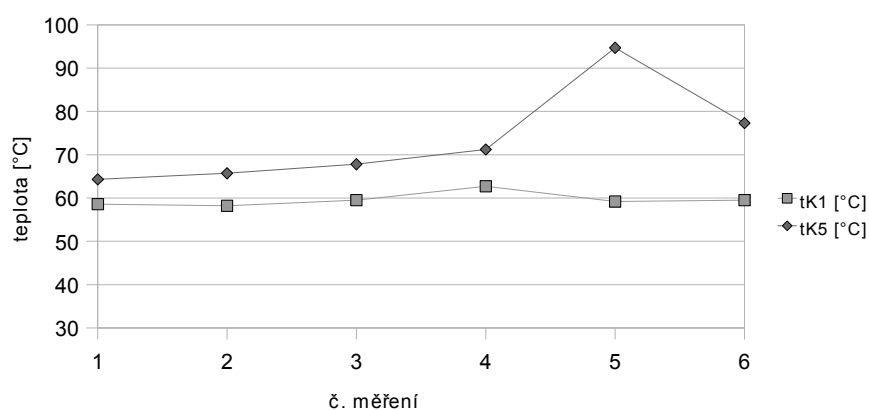


**Graf 6.3:** Závislost provozní teploty součástí rezačky na čase provozu

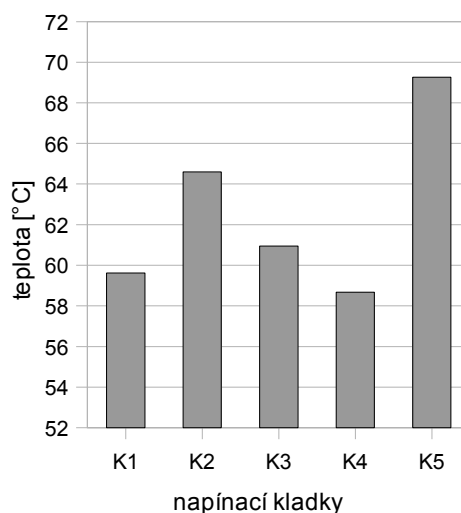
### 6.2.5 Vyhodnocení naměřených hodnot a termosnímků sklízecích mlátiček

Prvním druhem strojní součásti nacházející se na obou sklízecích mlátičkách byly napínací kladky řemenů. Řemenové převody se z provozně-technických důvodů na sklízecích mlátičkách využívají velmi hojně a kladky jsou zde užity za účelem správného napnutí řemene, zvětšení úhlu opásání řemenice řemenem a u dlouhých řemenových převodů slouží kladky jako vodící prvek. Sledování této jednoduché strojní součásti bylo zařazeno z důvodu návaznosti na vyšší strojní celky, kde se nemalou měrou svou bezvadnou funkcí podílí na technickém stavu řemenů. Dle výrobců je nejčastěji poškození řemenů zapříčiněno provozním prostředím, kde hlavními faktory je prašnost, vlhkost a jiné nečistoty (mastnota, chemické látky) a z technických parametrů předepnutí řemenů (prokluz) a provozní teplota.

Z hodnot naměřených na novější sklízecí mlátičce uvedených v tabulce 6.8 byla stanovena průměrná provozní teplota sledovaných kladek  $t_K = 60\text{ °C}$  s odchylkou  $\pm 5\text{ °C}$ . U kladek K1 až K4 se v průběhu měření nevyskytly žádné teplotní anomálie. Kladka K5 (tabulka 6.9), nacházející se na starším stroji, vykazovala ve srovnání s kládkami K1-K4 zvýšenou průměrnou provozní teplotu  $t_{K5} = 69,3\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ . Z grafu 6.4 Porovnání provozních teplot kládky K1 a K5 v čase sledování je patrný skokový nárůst teploty kládky K5 o  $\Delta t = 25,4\text{ °C}$ . Tato odchylka od stanovené průměrné provozní teploty byla po konzultaci s obsluhou zhodnocena jako abnormální, nicméně nekritická. Přesto bylo pracovníkem technické údržby aplikováno mazivo k ložisku kládky a po tomto zákroku, při pokračující sklizni, byl zaznamenán pokles provozní teploty o  $\Delta t = 17,4\text{ °C}$  téměř na mezní úroveň stanovené průměrné provozní teploty kládky.



**Graf 6.4:** Porovnání provozních teplot kládek K1 a K5



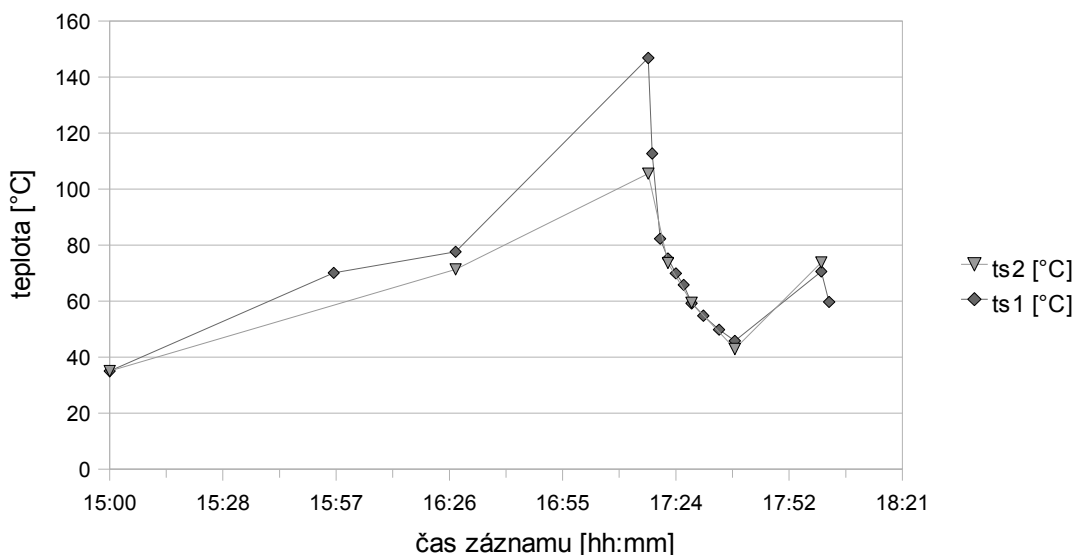
**Graf 6.5:** Porovnání průměrných provozních teplot kládek K1-K5

Druhým předmětem sledování byla žací lišta a její části. Na novější sklízecí mlátičce proběhla před žněmi kompletní výměna žacího ústrojí, proto naměřené hodnoty posloužily jako referenční k hodnotám naměřeným na starší sklízecí mlátičce.

Průměrná provozní teplota nové lišty byla stanovena na  $t_{\text{prům}} = 43 \text{ °C}$  s odchylkou  $\pm 2 \text{ °C}$ . Této hodnoty dosahovaly všechny sledované části, tj. prsty, přídržovače i smykadlo a hlavice kosal. Teplotní anomálie byla detekována u několika prstů, na kterých byla naměřena nejvyšší teplota  $t_{\text{anomálie}} = 52,8 \text{ °C}$ . Příčinou bylo přihnutí prstů, které se tímto dostaly do kontaktu s lištou a v důsledku suchého tření mezi nimi se v daném místě zvýšila provozní teplota. K přihnutí prstů došlo při vyžínání bio-pásů, které byly v přímé návaznosti na lesní porost, kde na povrch pole byly rytím divoké zvěře vneseny větší kameny a různé rostlinné zbytky zavlečeny na okraj pole při lesním prořezu (kořeny, pařezy náletových křovin, apod.). Tato teplotní odchylka byla nekritická. Pro technickou údržbu by termosnímek zachycující tuto rozdílnost mohl být jednoznačným diagnostickým signálem pro snadnou identifikaci kde došlo k poškození mechanismu vlivem vniknutí cizího tělesa na kosu.

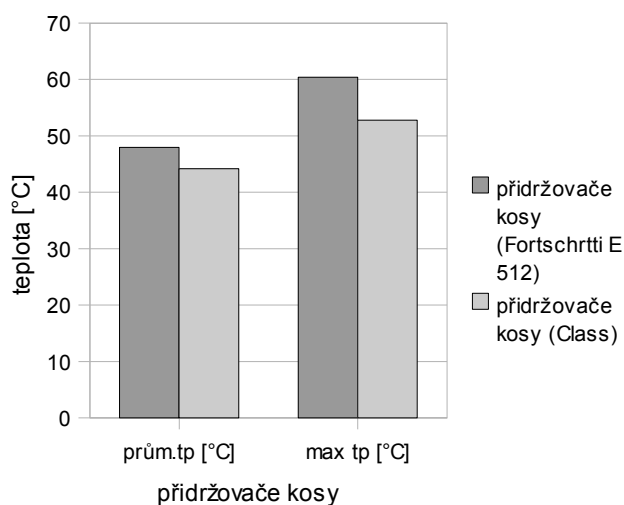
Žací lišta starší sklízecí mlátičky vykazovala obecně vyšší provozní teploty všech sledovaných částí. To vyplývá jednak z délky provozního života stroje a také z povahy samotné konstrukce mechanismu pohonu žací lišty. Za předmět sledování bylo zvoleno smykadlo a hlavice kosal, kde se u těchto součástí předpokládalo zvýšené provozní zatížení. Průměrná provozní teplota smykadla a přímo navazujících součástí (hlava, vodítko, přídržovač) byla stanovena  $t_s = 76 \text{ °C}$  s odchylkou  $\pm 5 \text{ °C}$ . V porovnání s hodnotou novějšího stroje je tato téměř dvojnásobná. V grafu 6.6 je zaznamenán teplotní průběh smykadla v čase provozního nasazení stroje, kde je patrný značný teplotní výkyv přibližně po 140 minutách provozu. Maximální naměřená teplota činila  $146,8 \text{ °C}$ . Po oznámení obsluhy byl stroj zastaven a sklizeň přerušena. Pokud by stroj v tomto stavu pokračoval dále v nepřetržitém provozu, pak by dle teoretických výpočtů odvislých od dosavadního trendu nárůstu teploty dosáhly sledované součásti kritické hodnoty pro vznícení obilného prachu za 133 min a pro vznícení slámy do 165 min.

Obsluhou bylo aplikováno mazivo do maznice kulové hlavice ručním mazacím lisem a též byly ošetřeny styčné plochy smykadla. Také byl upraven systém polních prací, kdy vyprazdňování zásobníku obilí neprobíhalo kontinuálně s pokračující sklizní, ale za klidu, při kterém stihly sledované součásti vychladnout pod stanovenou průměrnou provozní teplotu  $t_s$ .



**Graf 6.6:** Vývoj provozní teploty smykadla starší žací lišty v čase pozorování

Provedeno bylo i snímkování přidržovačů kosa a průměrná provozní teplota stanovena  $t_p = 48 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . I zde byla zaznamenána odchylka jednoho přidržovače, který dosahoval maximální teploty  $t_{p2} = 60,4 \text{ °C}$ . V porovnání s novou žací lištou, u které byla stanovena průměrná provozní teplota přidržovačů  $t_{prům} = 44 \text{ °C}$ , dosahovala teplotní anomálie hodnoty  $t_{anomálie} = 52,8 \text{ °C}$ , což odpovídá hraniční hodnotě průměrné provozní teploty přidržovačů starší žací lišty. Na obou žacích lištách nebyly hodnoty brány jako kritické. Obsluze byla místa výskytu zvýšené provozní teploty identifikována pro možnost provedení opravy a seřízení například při nadcházející plánované údržbě nebo generální kontrole technického stavu na konci sezony.



**Graf 6.7:** Srovnání průměrných a maximálních naměřených teplot přidržovačů kosa

## 6.2.6 Vyhodnocení termogramů doplňkového měření provedeného na sklízecí mlátičce (Fortschritt E 512), diskovém podmítači a lisu na slámu.

### Sklízecí mlátička Fortschritt E 512

Na starší sklízecí mlátičce bylo provedeno snímkování několika dalších strojních částí, u kterých by dle provozní zkušenosti obsluhy mohlo dojít k poruše nebo k výskytu vyšších provozních teplot. Jednalo se o ložiska výmlatového bubnu, chladič a výfuk, resp. jeho napojení na hlavu motoru.

Z termogramů ložisek výmlatového bubnu nebyla zaznamenána žádná teplotní anomálie. Průměrná provozní teplota byla stanovena u prvního ložiska  $t_{L1} = 55,6 \text{ °C}$  a u druhého  $t_{L2} = 61,2 \text{ °C}$ . Teplotní rozdíl těchto ložisek  $\Delta t = 5,6 \text{ °C}$  byl způsoben vlastností konstrukce stroje, kdy ložisko L2 je ložiskem ze strany řemenice pohánějící řemenovým převodem výmlatový buben. Z tohoto důvodu je ložisko L2 více namáháno a jeho provozní teplota je proto vyšší.

Ze snímků chladiče odečtené tepelné hodnoty vykazovaly značný nárůst na hodnotu  $t_{chl} = 102,2 \text{ °C}$ . Obsluhou byla tato teplota vyhodnocena jako anomální a bylo přistoupeno k nápravným opatřením. Těleso chladiče bylo vyčištěno a zbaveno nánosů prachu a dalších obilných částí ulpělých při sklizni. Tímto byla provozní teplota chladiče snížena přibližně o  $\Delta t = 10 \text{ °C}$ . Při dále probíhajících sklizňových pracích však postupně docházelo k opětovnému ulpívání obilného prachu a tím k postupnému narůstání provozní teploty chladiče. Pravidelným čištěním stroje je možné udržovat průměrnou provozní teplotu chladiče v rozmezí 80-90 °C, která byla obsluhou hodnocena jako přijatelná.

Nejvyšších provozních teplot na celé sklízecí mlátičce dosahovaly součásti motoru. Na napojení výfuku k hlavě motoru byla detekována hodnota přesahující 250 °C. Za klimatických podmínek, které v průběhu žní panovaly, bylo této hranice při provozním nasazení běžně dosahováno. Z tabulky 2.1 Teploty vznícení vybraných materiálů, se kterými se v zemědělství shledáváme prakticky nejčastěji, vyčteme hodnoty teplot vznícení  $t_{vz} \text{ [°C]}$  sena (233°C), slámy (310°C) a obilného prachu (267°C). Porovnáním těchto hodnot patřičného materiálu s dosahovanou provozní teplotou výfuku lze konstatovat, že se tato hodnota velmi blíží kritické, při které by mohlo velmi snadno dojít k polnímu požáru.



**Tabulka 6.15:** Teploty vybraných částí na sklízecí mlátičce Fortschritt E 512

č. měření	teplota výfuku $t_v$ [°C]	teplota chladiče $t_{chl}$ [°C]	teplota ložiska výmlatového bubnu $t_{L1}$ [°C]	teplota ložiska výmlatového bubnu $t_{L2}$ [°C]
1	-	78,1	51,1	64,1
2	-	-	48	55,7
3	251,6	102,2	-	64,1
4	165,6	78,5	60,7	-
5	243,2	94,1	-	60,9
6	242,6	90,8	62,4	-
prům.teplota součástí	245,8	85,4	55,6	61,2

### Lis pro výrobu válcových balíků slámy

Po sklizni obilniny byla sláma připravena pro sběr a úpravu na balíky. Termosnímky ložisek lisu byly pořízeny namátkou v průběhu polních prací přibližně po hodině a poté po dvou hodinách provozu. Obsluha prováděla kontrolu stroje a doplnění maziva každý den před zahájením prací z důvodu zvýšeného rizika požárů. Tomu odpovídal i technický stav lisu, u kterého nebyla odhalena žádná teplotní anomálie. Průměrná provozní teplota ložisek pýchovacího šneku byla stanovena na  $t_{pých} = 40 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ . Této průměrné provozní teploty dosahovala prakticky i všechna ostatní ložiska na lisu.

Překvapivý teplotní nárůst byl zaznamenán na bocích lisovací komory, kde se teplota po svinutí balíku pohybovala okolo 60-70 °C. Tato teplota byla generována třením slámy o boky lisovací komory. V běžném provozním režimu lisu však nedocházelo k akumulaci tohoto tepla a teplota komory vždy při uvolnění hotového balíku a do dalšího naplnění slámou stihla klesnout na průměrnou teplotu stroje 40 °C.

## Diskový podmítač

Po sklizni slámy navazovaly polní pracovní operace podmínkou diskovým podmítačem. Pasivní půdu zpracující orgány stroje (disky, talíře) byly uloženy na společné hřídeli v kuželíkových ložiskách. Tato ložiska nebyla bezúdržbová, proto byla vybavena maznicí pro ruční doplňování mazacího tuku mazacím lisem během provozního života stroje. Termogramy byly pořízeny jednorázově při probíhající podmítce. K okamžitému vyhodnocení bylo využito komparativní metody, kdy byly zaznamenány teploty všech ložisek nesoucích hřídele s diskem a ty byly vzájemně porovnány. Provozní teplota ložisek byla velmi vyrovnaná, a tak byla průměrná provozní teplota stanovena na  $t_{pr} = 36 \text{ °C}$  s odchylkou  $\pm 2 \text{ °C}$ .

Jedno ložisko vykazovalo rozdílnou teplotu v porovnání se všemi ostatními o  $\Delta t = 6 \text{ °C}$ . Teplota tohoto ložiska nebyla klasifikována jako kritická, nicméně lze tuto odchylku považovat za jistý diagnostický signál. Za předpokladu, že ostatní ložiska měla provozní teplotu v mezích stanovené odchylky prakticky shodnou, lze usuzovat, že v ložisku s diagnostikovanou teplotní anomálií se začíná projevovat porucha s charakterem postupně narůstajícího defektu. Příčina mohla být pouze v nedostatečném množství maziva, které by bylo snadno doplnitelné. Najetím brány na kámen mohlo dojít k vnitřnímu poškození ložiska v důsledku absence vyhlubovacího mechanismu chránícího pracovní orgány podmítačů před poškozením.

Obsluha byla o tomto informována a po ukončení prací bylo doplněno mazivo ručním lisem s tím vědomím, že pokud by se teplota tohoto ložiska v následujících pracovních dnech dále zvyšovala, lze předpokládat jeho poruchu, případně možné zadření a následně jeho nutnou výměnu.

## 7 Závěr

Cílem práce bylo prověřit možnost využití tepelného záření těles snímaného termokamerou pro indikaci stupně opotřebení nebo včasného odhalení zdroje poruch strojů a zařízení v zemědělských provozech. Za tímto účelem je v práci uvedena teorie fyzikálních jevů a zákonů, které jsou pro pochopení problematiky termovizního snímání důležité.

Pro praktické využití bylo v práci navrženo několik postupů pro realizaci termovizního snímání a metodický postup pro následné vyhodnocení dat získaných z pořízených termovizních snímků. Na základě zde popsaných fyzikálně- mechanických vlastností sledovaných součástí je možné vyvozovat závěry o provozní spolehlivosti strojů a životnosti strojních součástí.

Informace v podobě tepelných hodnot získaných z termosnímků není možné paušalizovat a brát jako normativní pro všechny stroje. I pro stroje stejného typu a konstrukčního řešení se mohou hodnoty lišit v závislosti na mnoha uvedených provozních faktorech. Proto je nutné pro každý stroj a jeho součásti stanovit kritéria závažnosti diagnostikovaných hodnot separátně v závislosti na průběžném sledování stroje, na základě získaných informací z jiných diagnostických metod nebo z informací uváděných výrobcem.

Výše popsané modelové příklady mohou posloužit jako předloha pro vypracování sofistikovanějších postupů termovizního snímání teplotních polí pro následnou interpretaci výsledků s jistou vypovídací hodnotou vztaženou k technickým vlastnostem sledovaného stroje.

Závěrem tedy je, že tepelné záření tělesa zachycené pomocí moderní technologie termovizního snímání (termokamery), může být v daných případech využito jako typický diagnostický signál získaný při průběžném sledování stroje během jeho provozu. Ze získaných termosnímků, a z nich následně odečtených tepelných hodnot, lze predikovat možnost vzniku poruch ještě před jejich plným projevením a omezit tím následné možné vyšší ztráty za předpokladu zahrnutí všech relevantních faktorů ovlivňujících technický stav součástí a tím délku provozního života předmětů sledování.

## 8 Seznam literatury a internetových zdrojů

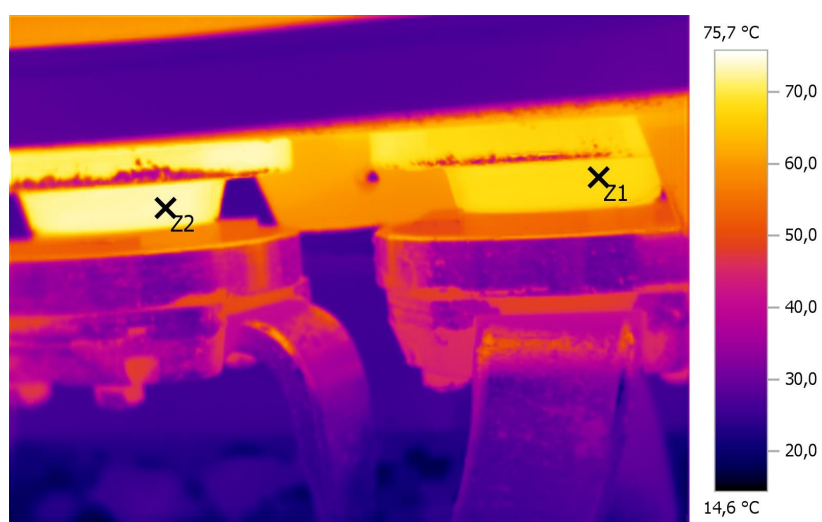
1. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9\\_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD)
2. <http://www.podpora-techniky.cz/page/tepelne-zareni>
3. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Teplo>
4. <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>
5. <http://www.blue-panther.cz/data/files/clanek-metrologie3-emisivita-potiz-presneho-radiometrickeho-mereni-zalomeny-339.pdf>
6. <http://www.termokamera.cz>
7. [http://kvinta.html.wz.cz/fyzika/optika/elmg\\_zareni\\_a\\_jeho\\_energie/zareni\\_cerneho\\_telesa.htm](http://kvinta.html.wz.cz/fyzika/optika/elmg_zareni_a_jeho_energie/zareni_cerneho_telesa.htm)
8. [http://www.slideshare.net/workswell/zaklady-prace-s-termokamerou?next\\_slideshow=1](http://www.slideshare.net/workswell/zaklady-prace-s-termokamerou?next_slideshow=1)
9. [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace\\_06\\_1105\\_2.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_06_1105_2.pdf)
10. <http://www.igniscon.cz/informace-o-vybuchu/vybuchy-prachu/>
11. [http://automa.cz/index.php?id\\_document=52891](http://automa.cz/index.php?id_document=52891)
12. [http://www.slideshare.net/workswell/zaklady-prace-s-termokamerou?next\\_slideshow=1](http://www.slideshare.net/workswell/zaklady-prace-s-termokamerou?next_slideshow=1)
13. Ripka, P., Ďado, S., Kreidl, M., Novák, J.: Senzory a převodníky. Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. 135 s. ISBN 80-01-03123-3
14. [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery\\_1.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf)
15. Havlíček, J. a kol.: Provozní spolehlivost strojů. Státní zemědělské nakladatelství, 1. vyd. Praha, 1983. 656 s.
16. Bureš, O. a kol.: Traktory a automobily. Státní zemědělské nakladatelství, 1. vyd. Praha, 1980. 464 s.;
17. <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/11-vady-s-poskozeni-lozisek>
18. <http://www.mmspektrum.com/clanek/poznatky-v-oblasti-hydrostatickych-lozisek.html>
19. <http://www.347.vsb.cz/staff/kunzova/zs-kunzova-prednaska10.pdf>

(staženo dne 20.11.2015)

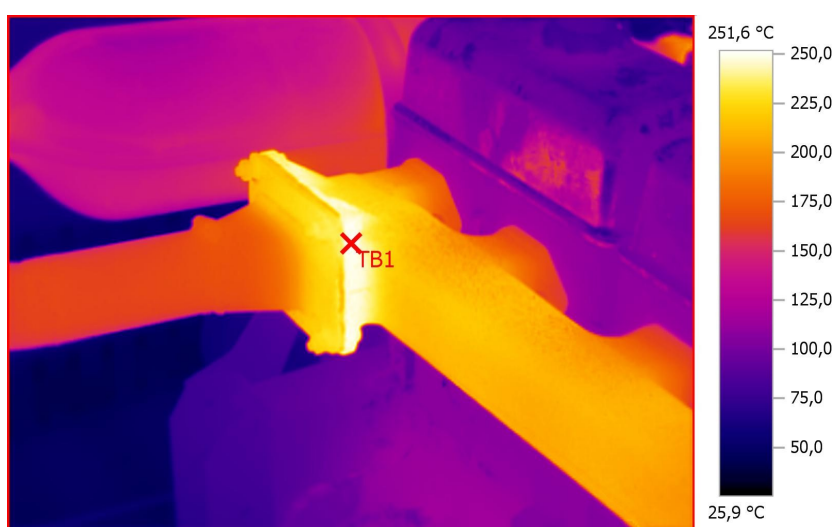
## Příloha: Vybrané termogramy sledovaných částí zemědělských strojů



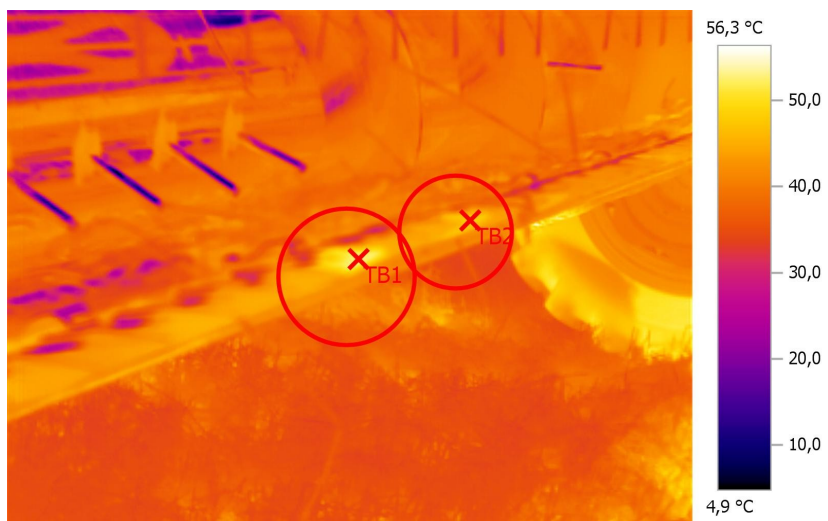
1. Termogram napínací kladky na sklízecí mlátiče



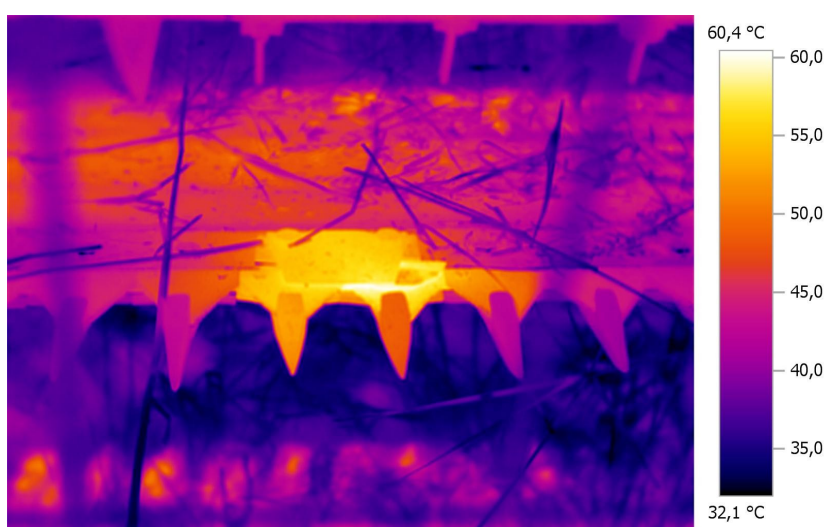
2. Termogram aktivních rotačních prvků vířivé brány



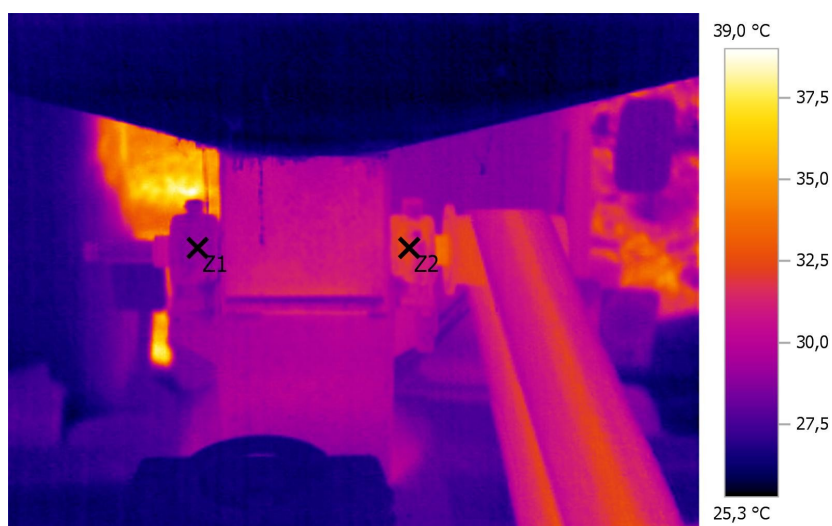
3. Termogram napojení hlavy motoru na výfuk (sklízecí mlátička)



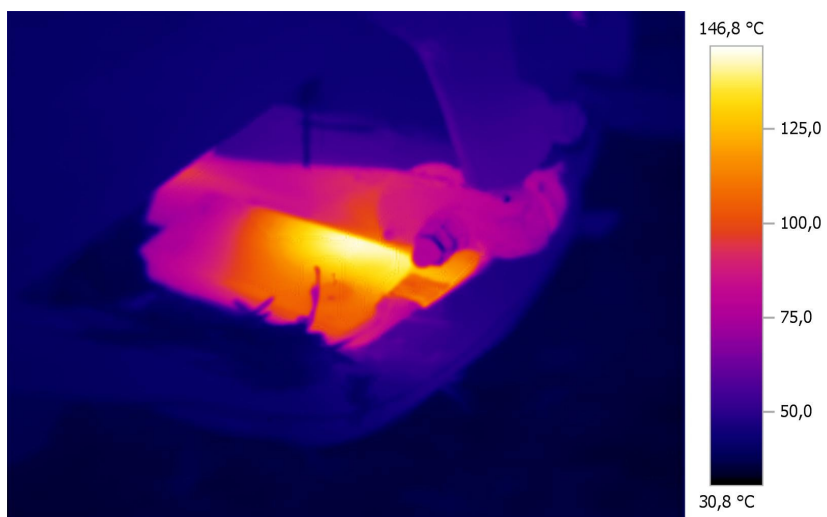
4. Termogram novější žací lišty



5. Termogram přidržovače starší žací lišty



6. Termogram ložisek štotovníku



7. Termogram smykadla starší žací lišty



8. Termogram hlavice novější žací lišty



9. Termogram ložiska diskového podmítače