

# Termografie a termodiagnostika

## 1. laboratorní cvičení – práce BMT-3

### Zadání

1. Zaznamenejte si označení a čísla přístrojů, se kterými budete provádět měření.
2. Proveďte kontrolu správnosti měření termokamerou a IČ teploměrem při teplotách 20 °C a 50 °C.
3. Měření temperované desky termokamerou a IČ teploměrem.
4. Měření dynamického děje.
5. Vyhodnocení měření

### Vypracování

#### 1 Přístroje a jejich nastavení

Kalibrace:

- HYPERION R - 20 °C
- GEMINI R - 50 °C

IČ teploměr:

- označení: OPTRIS-LS
- sériové číslo: 9050023

Termokamera:

- označení: FLIR
- pořadové číslo: 2

Temperovaná deska:

- pořadové číslo: 3
- pozice (režim) Peltierových článků: D2 (chlazení), C7 (ohřev), G7 (ohřev)

Laboratorní podmínky:

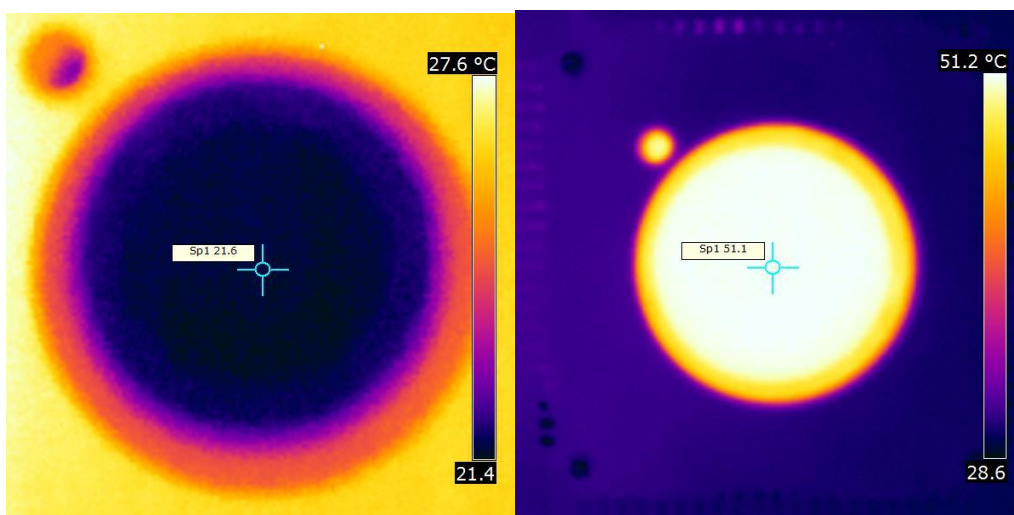
- teplota: 24,4 °C
- relativní vlhkost: 35 %

#### 2 Kalibrace

Na kalibračním černém tělese HYPERION byla nastavena teplota 20 °C a na GEMINI 50 °C. Emisivita infračerveného (IČ) teploměru OPTRIS-LS byla nastavena na hodnotu 0,995, emisivita termokamery FLIR 2 na hodnotu 0,99. Po ustálení teplot v dutinách simulujících černé těleso obou kalibračních zařízení bylo IČ teploměrem naměřeno 5 hodnot, které byly následně zprůměrovány a porovnány se skutečnou hodnotou. S termokamerou byly pořízeny termosnímky obou dutin (viz obr. 1) a jejich teplota posléze vyhodnocena v programu FLIR QuickReport, kde byly také upraveny parametry shrnuté v tabulce 1. Porovnání teplot naměřených se skutečnými teplotami kalibračních zařízení je v tabulce 2.

Tabulka 1: Parametry nastavené při vyhodnocení termosnímků dutin ČT v programu FLIR QuicReport.

	hodnota	jednotka
<b>Emisivita:</b>	0,99	1
<b>Odražená teplota:</b>	24,4	°C
<b>Atmosférická teplota:</b>	24,4	°C
<b>Relativní vlhkost:</b>	0,35	1
<b>Vzdálenost:</b>	0,5	m



Obrázek 1: Termosnímky dutin kalibračních zařízení HYPERION R (vlevo) a GEMINI R (vpravo) vyhřáté na 20 a 50 °C před úpravou ovlivňujících parametrů v tabulce 1.

Tabulka 2: Skutečné a naměřené teploty v dutinách kalibračních zařízení a jejich odchylka (absolutní hodnota rozdílu).

teploty (°C)	IČ teploměr			termokamera		
	skutečná	naměřená (průměr)	odchylka	skutečná	naměřená (extrém)	odchylka
<b>HYPERION</b>	20,14	21,6	1,46	20	19,94	0,06
<b>GEMINI</b>	50	51,1	1,10	50	50,45	0,45

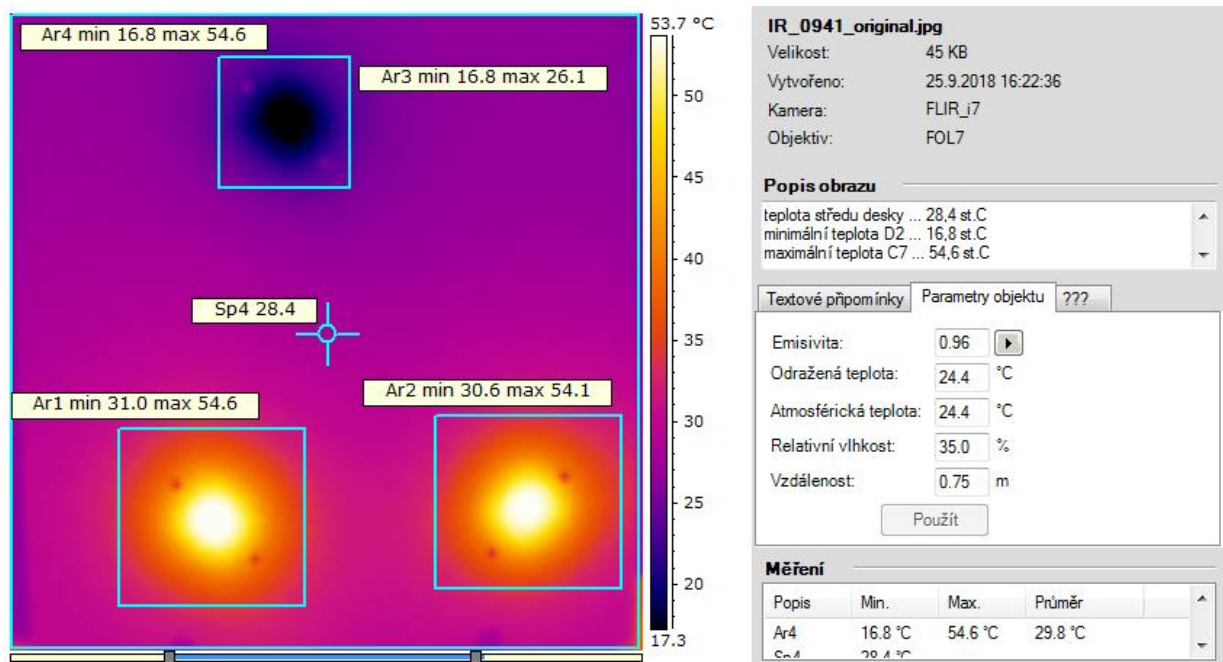
Z hodnot odchylek v tabulce 2 lze usoudit, že termokamera je při správném nastavení okolních ovlivňujících podmínek (tab. 1) schopna přesnějších měření než IČ teploměr.

### 3 Měření temperované desky

Peltierovy články C7 a G7 na desce 3 byly nastaveny na ohřev, zatímco článek D2 na chlazení. IČ teploměr byl spárován s programem Optris Connect a jeho parametr emisivity nastaven na emisivitu desky ( $\varepsilon = 0,96$ ). Následně byly postupně snímány teploty středu desky a polí s Peltierovými články nejdříve pomocí křížového zaměřovače ze vzdálenosti cca 50 cm a poté dvoubodovým zaměřovačem tak, aby pomyslná kružnice mezi body zaměřovače odpovídala vepsané kružnici snímaného pole. Dvoubodovým zaměřovačem byl také zaměřen střed desky ze vzdálenosti cca 6,5 cm a celá deska ze vzdálenosti cca 1,5 m. Termokamerou byla změřena celá deska ze vzdálenosti cca 0,75 m a výsledný termogram vyhodnocen v programu FLIR QuicReport (viz obr 2). Naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulce 3.

Tabulka 3: Teploty temperované desky naměřené IČ teploměrem a termokamerou.

teploty (°C)	IČ Teploměr		termokamera
	křížový	dvoubodový	-
<b>střed</b>	27,6	27,5	28,4
<b>D2</b>	16,3	15,8	16,8
<b>C7</b>	54,9	54	54,6
<b>G7</b>	54,3	54,2	54,1
<b>celá</b>	-	28,3	29,8

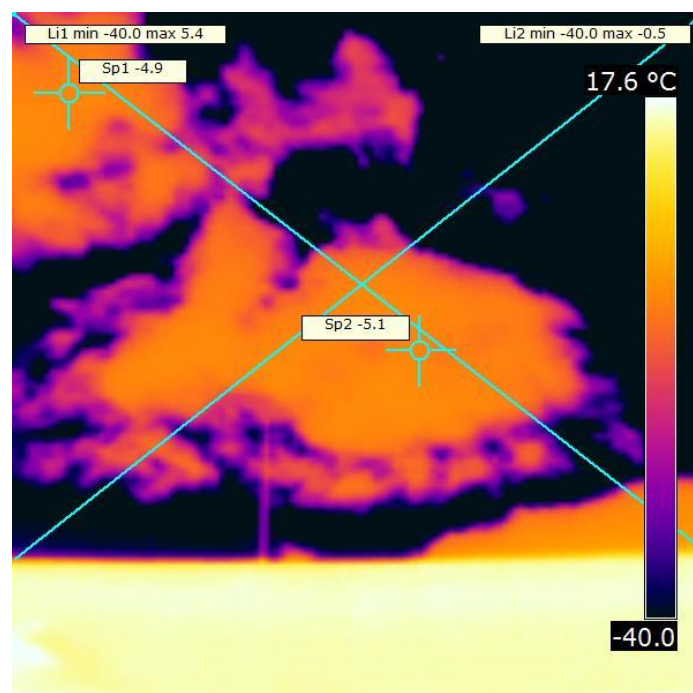


Obrázek 2: Termosnímek temperované desky vyhodnocený v programu FLIR QuicReport.

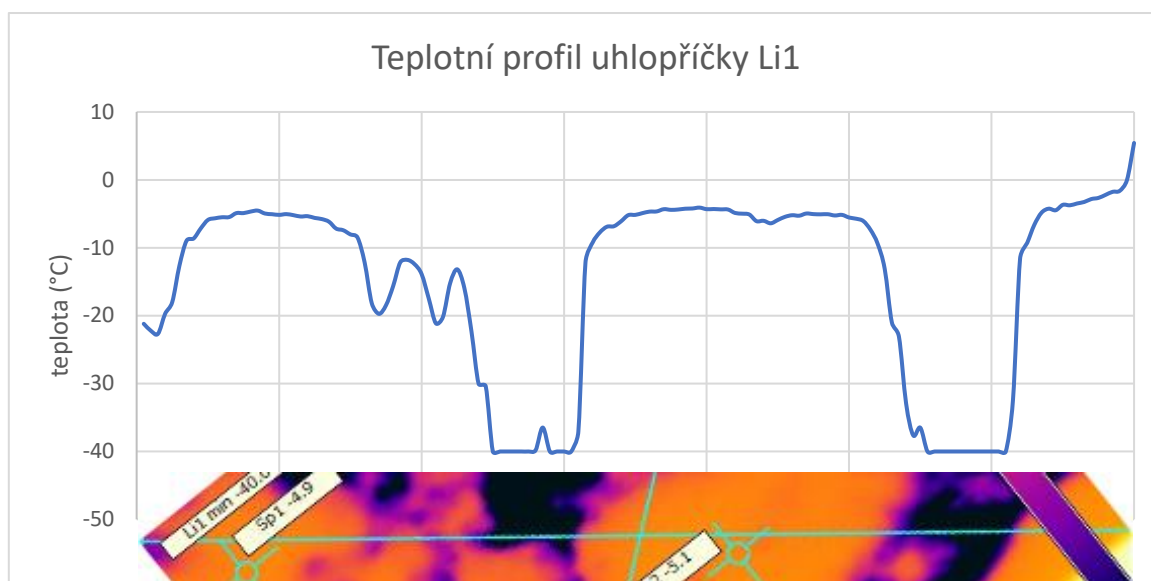
V termosnímku na obrázku 2 jsou využity funkce programu FLIR QuicReport pro vyhodnocení teploty (maximální, minimální a průměrné) v dané oblasti (Ar) ke zjištění teplotních extrémů v bodech temperovaných Peltierovými články a následně funkce vyhodnocení teploty bodu (Sp4) pro určení teploty středu desky.

#### 4 Vyhodnocení vybraného termosnímku

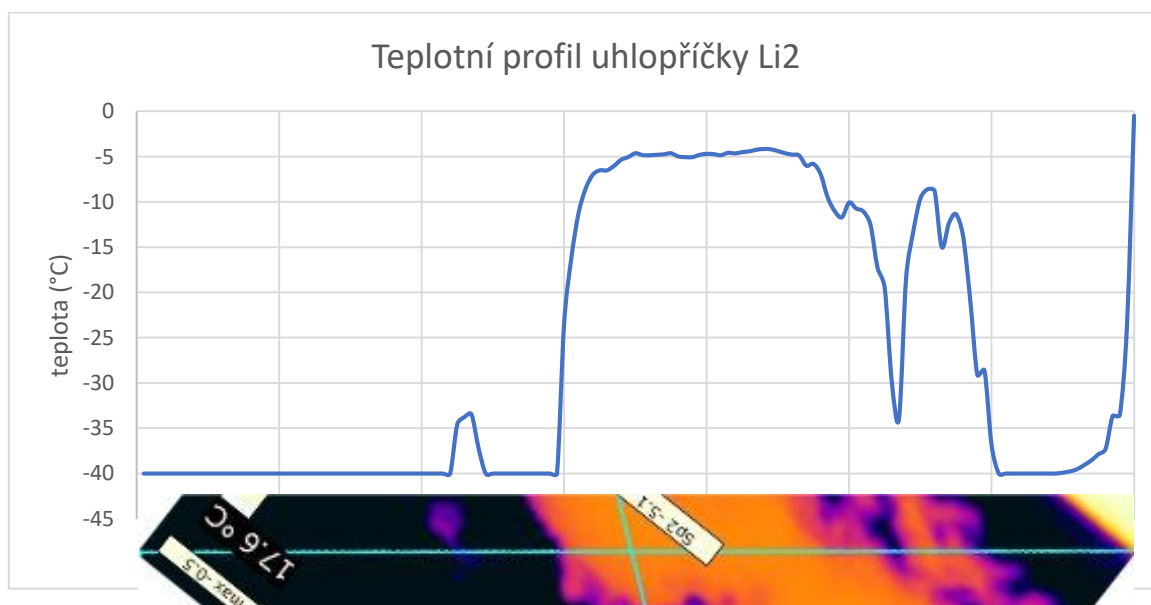
Pro tuto úlohu byl zvolen termosnímek oblohy, který byl pořízen kamerou FLIR 2 z okna laboratoře B224 (viz obr. 3).



Obrázek 3: Termosnímek oblohy s mraky snímáný z okna laboratoře.



Obrázek 4: Teplotní profil uhlopříčky Li1 s výřezem z termosnímku pro referenci.



Obrázek 5: Teplotní profil uhlopříčky Li2 s výřezem z termosnímku pro referenci.

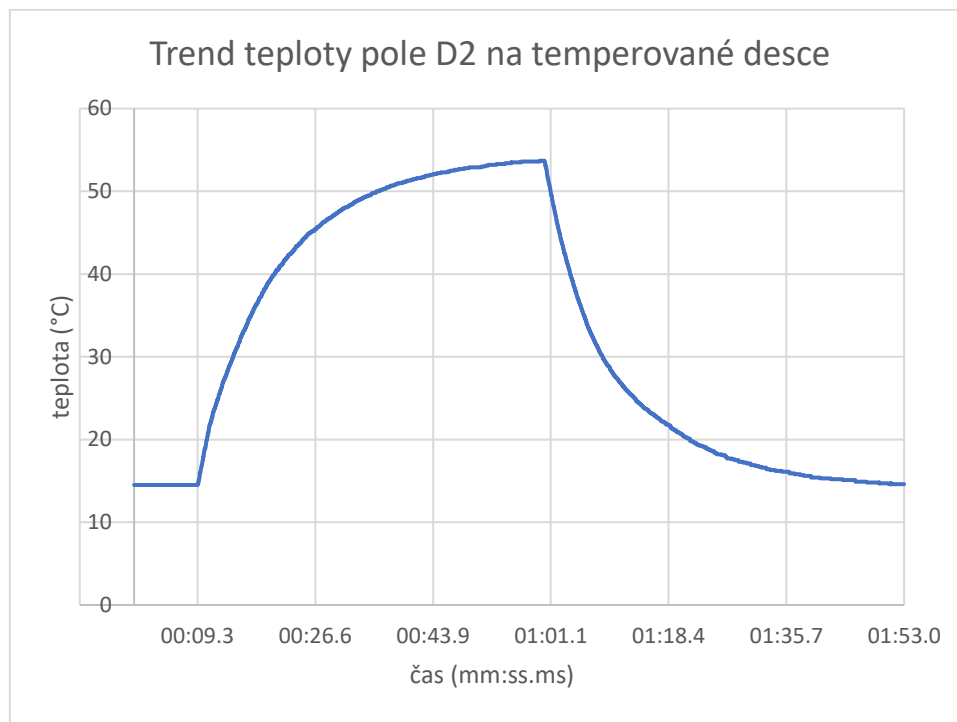
V teplotních profilech na obr. 4 a 5 lze pozorovat, že mimo oblasti mraků je IČ záření tak nízké, že naměřená hodnota teploty je rovna  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což je minimální teplota, kterou je termokamera schopna naměřit a zobrazit. V oblastech s mraky zobrazuje kamera cca  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tyto hodnoty však také nebudou příliš přesné, jelikož není k dispozici správná hodnota emisivity a vzdálenost mraků od termokamery. Hodnoty ovlivňujících parametrů, které byly nastaveny při vyhodnocení termosnímku na obr. 3 a teplotních profilů na obr 4 a 5 jsou shrnuty v tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry nastavené při vyhodnocení termosnímku oblohy v programu FLIR QuicReport.

	hodnota	jednotka
Emisivita:	0,96	1
Odražená teplota:	12,8 (měla být nižší)	$^{\circ}\text{C}$
Atmosférická teplota:	12,8	$^{\circ}\text{C}$
Relativní vlhkost:	0,2	1
Vzdálenost:	1500	m

## 5 Měření dynamického děje

IČ teploměr byl zaměřen křížovým zaměřovačem na pole D2 s Peltierovým článkem v režimu chlazení. V programu Optris Connect byl spuštěn kontinuální záznam teploty. Článek byl nejprve přepnut z režimu chlazení do režimu topení a po ustálení (cca 40 s) přepnut zpět do režimu chlazení. Výsledná přechodová charakteristika teploty pole D2 je zaznamenána v grafu na obrázku 6.



Obrázek 6: Vývoj teploty pole D2 temperované desky v čase.

Z grafu na obrázku 6 je zřejmé, že temperování pole desky Peltierovým článkem má charakter soustavy 1. řádu, kterou lze jednoznačně popsat zesílením ( $r_0$ ) a časovou konstantou ( $T$ ). Při stanovení předpokladu, že přepnutí mezi režimem chlazení/ohřev odpovídá jednotkovému skoku, lze získat zesílení  $r_0$  rozdílem mezi maximální a minimální hodnotou v naměřených hodnotách ( $r_0 = y_{max} - y_{min}$ ). Časovou konstantu lze získat nalezením času, kdy naměřená teplota  $y$  dosáhla  $(1 - \frac{1}{e}) \cong 63,2\%$  ustálené hodnoty. Pro tuto soustavu vyšly parametry následovně:

$$r_0 = 39,2$$

$$T = 10,6 \text{ s}$$

Dosažením těchto hodnot do výpočetního vztahu hodnot soustavy 1. řádu pro rostoucí trend

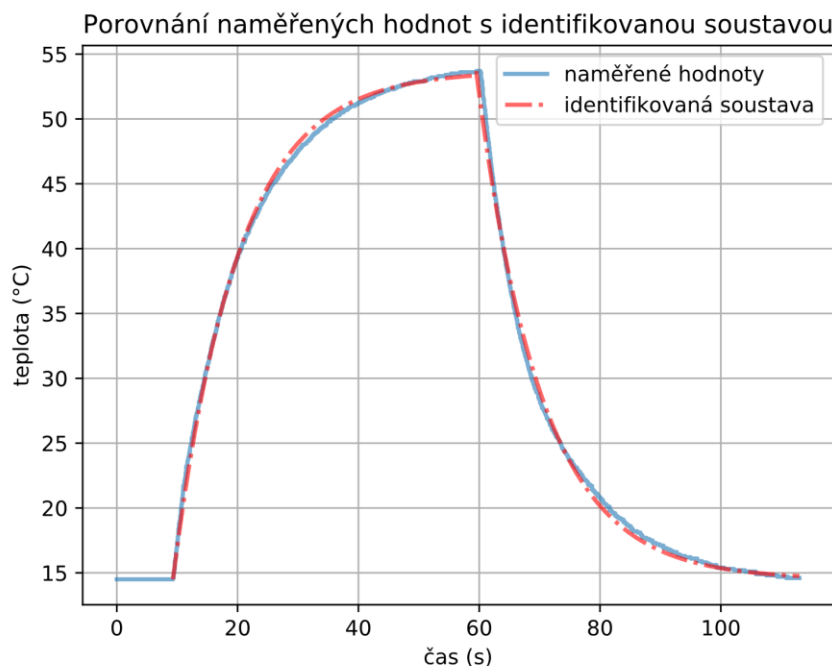
$$y = r_0(1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

resp. klesající trend

$$y = r_0(e^{-\frac{t}{T}} - 1)$$

Lze získat aproximaci vývoje naměřených hodnot soustavou 1. řádu.

Porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočtenými vztahem pro soustavu 1. řádu se získanými parametry lze pozorovat na obr. 7



Obrázek 7: Graf naměřených hodnot (modře) a hodnot vypočtených ze vztahů pro soustavu 1. řádu po dosazení získaných hodnot zesílení a časové konstanty.

## Závěr

V práci byly otestovány základní funkce infračerveného teploměru a termokamery a zpracování údajů z nich vystupujících. V kap. 2 byla provedena kontrola správné kalibrace teploměru a termokamery na kalibračních zařízeních HYPERION R a GEMINI R. V kap. 3 byly IČ teploměr a termokamera využity pro měření povrchové teploty na temperované desce s Peltierovými články. V kap. 4 byl využit program FLIR QuickReport pro vyhodnocení termosnímků oblohy s mraky a teplotního profilu na jeho uhlopříčkách. V kap. 5 byl pozorován dynamický přechodový děj při změně režimu Peltierova článku D2 na temperované desce z režimu chlazení na ohřev a zase zpět. Z naměřených dat byl pochod vyhodnocen jako charakteristický přechodový děj soustavy 1. řádu a byla provedena jeho identifikace (nalezení parametrů zesílení a časové konstanty). Posléze byla identifikovaná soustava 1. řádu porovnána s naměřenými hodnotami a vykreslena za pomoci programovacího jazyka Python 3 s moduly pandas a matplotlib.

## Příloha

Identifikace zesílení a časové konstanty naměřených dat a jejich vykreslení v programu Python.

```
# -- coding: cp1250 --
import math
import pandas as pd
from matplotlib import pyplot as plt

def load_data(filename, path='./', delimiter='\t', usecols=None):
    """ load the data from filename in specified path """

    df = pd.read_csv(path + filename, delimiter=delimiter, header=0,
usecols=usecols, encoding='cp1250')
    df['Time'] = pd.to_datetime(df['Time'], format='%M:%S.%f')

    return df
```

```
def identify_first_order(time, values):  
    """get the gain and time constant of a first order system from a series of  
    values"""  
  
    # find extremes of temperature in data  
    t_min, t_min_index = (min(values), values.idxmin())  
    t_max, t_max_index = (max(values), values.idxmax())  
  
    # find the equivalent of 63.2% value change  
    t_632 = t_min + (t_max - t_min)*0.632  
  
    # find the closest value to the t_632 and its index  
    t_closest = values.iloc[(values - t_632).abs().argsort()[2:3]]  
  
    # find the index of first value change (beginning of change)  
    start_index = find_first_change(values)  
  
    # compute the time constant and gain  
    gain = t_max - t_min  
    time_const = time[t_closest.index] - time[start_index]  
  
    return gain, float(time_const.dt.total_seconds())  
  
def find_first_change(series):  
    """find the index of first value change in the input series"""  
  
    s_min = min(series)  
  
    for index, value in enumerate(series):  
        if value > s_min:  
            return index  
  
def plot_first_order(r0, T, tspan, t0=0, y0=0, down=False):  
  
    if t0:  
        tspan0 = [t-t0 for t in tspan]  
    else:  
        tspan0 = tspan  
  
    if down:  
        values = [y0 + r0*(math.exp(-t/T)-1) for t in tspan0]  
    else:  
        values = [y0 + r0*(1-math.exp(-t/T)) for t in tspan0]  
  
    plt.plot(tspan, values, '-.r', alpha=0.6, linewidth=2)  
  
def plot_results(dframe, r0, T, handle=1):  
  
    # time span of the measurements in seconds  
    tspan_seconds = dframe['Time'].dt.minute * 60 + dframe['Time'].dt.second +  
dframe['Time'].dt.microsecond / 1e6  
  
    # important indices  
    start_index = find_first_change(dframe['Temp']) # index of the first change in  
value  
    max_index = dframe['Temp'].idxmax() # index of the maximum value  
  
    # slices for significant parts of the measurements  
    rising_part = slice(start_index, max_index)  
    declining_part = slice(max_index, None)  
  
    plt.figure(handle)  
    plt.plot(tspan_seconds, dframe['Temp'], alpha=0.6, linewidth=2) # plot  
the measured data  
    plot_first_order(r0, T, tspan_seconds[rising_part],  
                    t0=tspan_seconds[start_index],  
                    y0=dframe['Temp'][0]) # plot the  
identified series rising part
```

```
    plot_first_order(r0, T, tspan_seconds[declining_part],
                     t0=tspan_seconds[max_index],
                     y0=dframe['Temp'][max_index], down=True) # plot the
identified series rising part

plt.title('Porovnání naměřených hodnot s identifikovanou soustavou')
plt.xlabel('Čas (s)')
plt.ylabel('teplota (°C)')
plt.legend(['naměřené hodnoty', 'identifikovaná soustava'])
plt.grid()
plt.show()

if __name__ == '__main__':
    dframe = load_data('pyro_dynamika.txt')

    gain, time_constant = identify_first_order(dframe['Time'], dframe['Temp'])

    print('r0 = {:.1f} \nT = {:.1f} s'.format(gain, time_constant))

    plot_results(dframe, gain, time_constant)
```