# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



## Bakalářská práce

Liberec 2011

**Roman Heidler** 

## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

# Dimenzování rezistorů při mžikovém zatížení

# Dimensioning of resistors for transient pulse

Bakalářská práce

Autor:Roman HeidlerVedoucí práce:Ing. Miroslav Novák, Ph.D.Konzultant:Ing. Martin Černík, Ph.D.

V Liberci 2011

#### TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	Roman HEIDLER
Osobní číslo:	M08000021
Studijní program:	B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Elektronické informační a řídicí systémy
Název tématu:	Dimenzování rezistorů při mžikovém zatížení
Zadávající katedra:	Ústav mechatroniky a technické informatiky

#### Zásady pro vypracování:

- 1. Proveďte literární rešerši dostupné literatury zabývající se dimenzováním výkonových rezistorů pro krátkodobá zatížení v řádech jednotek ms.
- 2. Sestavte počítačový model pro simulaci obvodových veličin a oteplení rezistoru při zatížení.
- Navrhněte měřicí aparaturu pro zatěžování rezistorů impulsním proudem. Změřte vzorky různě konstruovaných rezistorů až do destrukce. Analyzujte místo a příčiny selhání rezistoru.
- 4. Výsledky měření vyhodnoťte a porovnejte s počítačovým modelem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

dle potřeby dokumentace cca 35-40 stran tištěná/elektronická

Forma zpracování bakalářské práce:

Seznam odborné literatury:

[1] Hampl, J. - Lipták, J. - Sedláček, J. - Štupl, K.: Materiály pro elektrotechniku. 2. přepr. vyd. Praha: Vydavetelství ČVUT, 1996. 165 s. ISBN 80-01-01544-0

Vedoucí bakalářské práce:

Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: Termín odevzdání bakalářské práce: 20. května 2011

Ing. Miroslav Novák, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky Ing. Martin Černík, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky

15. října 2010

V. Koprec

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc. děkan

V Liberci dne 15. října 2010



doc. Ing. Petr Tůma, CSc. vedoucí ústavu

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D za hodnotné rady a odborné vedení této bakalářské práce.

#### Anotace

#### Dimenzování rezistorů při mžikovém zatížení

Roman Heidler

Tato práce se zabývá problematikou dimenzování rezistorů při mžikovém zatížení. Určení správného jmenovitého výkonu rezistoru v režimu mžikového zatížení je komplexní problematika, přestože je rezistor poměrně jednoduchá elektronická součástka. Při vhodném určení jmenovitého výkonu lze ušetřit zastavěný prostor, hmotnost elektronického zařízení a v neposlední řadě finanční prostředky. V první části jsou uvedeny informace o problematice rezistorů při krátkodobém zatížení. V tomto dokumentu je navržen jednoduchý počítačový model popisující průběh oteplení rezistoru vzhledem k jeho příkonu navrhnutý pro jeden typ rezistoru. Na navrženém modelu je provedena citlivostní analýza parametrů modelu. Tento typ rezistoru byl poté zatěžován impulsy s různou energií až do jeho destrukce, průběhy napětí a elektrického proudu byly změřeny a zaznamenány. Výsledky měření jsou poté porovnány s výsledky simulace modelu. V závěru jsou diskutovány možnosti příčiny destrukce rezistoru a zlepšení počítačového modelu rezistoru.

Klíčová slova:

rezistor, dimenzování rezistorů, model rezistoru, krátkodobé zatížení, stupňový spouštěč

#### Annotation

#### Dimensioning of resistors for transient pulse

#### Roman Heidler

This work deals with resistor dimensioning during short time pulse load. Although resistor is a relatively simple electronic component, identification of the correct nominal power of the resistor under pulse load is a complex issue. We can save space, weight of the electronic equipment and also expenditures by identifying the appropriate nominal power. The first section provides information about the issue of resistors in a short-term load. A simple computer model describing the heating of the resistor due to its power created for one type of resistor is designed in this document. Sensitivity analysis is performed on an aforementioned model. This type of resistor was loaded by pulses with different energies up to its destruction. Behaviour of voltage and electrical current were measured and recorded. Outcomes of the measuring are then compared to the model simulation results. At the end of this document, causes of resistor destruction and improvements of the computer model of the resistor are discussed.

#### Key words:

resistor, dinemsion of resistors, model of resistor, transient pulse, step-start

## Obsah

Zadání	2
Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotace	5
Annotation	6
Seznam tabulek	9
Seznam obrázků	10
Seznam použitých symbolů	11
1. Úvod	13
2. Teorie používaná při návrhu rezistorů	15
<ul> <li>2.1 Maximální teplotní zatížení rezistorů</li></ul>	15 16 19 20 23 24 25 26
2.10 Analogy v tepelných procesech	20
3. Model rezistoru	29
<ul> <li>3.1 Model rezistoru vycházející z [Höft, 1983, s.38]</li> <li>3.2 Navržený model rezistoru</li></ul>	29 29 31 32 33 33 33
<ul> <li>3.4.1 Identifikace parametrů zjednodušené rovnice energetické bilance pomocí časové konstanty</li></ul>	34 35 37 38 38 39 39 42 42
4.Měření rezistoru při mžikové zatížení	45
<ul> <li>4.1 Měřicí aparatura</li> <li>4.2 Vlastní měření</li> <li>5. Vyhodnocení měření a porovnání výsledků s modelem</li> </ul>	45 46 47

5.1 Měření při zatížení 192 W	.47
5.2 Měření při zatížení 400 W	.49
5.3 Porovnání výsledků modelu a měření	.50
6. Závěr	.51
Seznam použité literatury	.52
Přílohy	.54
A Struktura dokumentů na přiloženém CD	.54

### Seznam tabulek

Tab.	1: Měrné teplo materiálů pro výrobu rezistorů [Heft, 1983, str. 39] 1	9
Tab.	2: Emisivita materiálů pro výrobu rezistorů [6, 7]1	9
Tab.	3:Tabulka tepelné vodivosti materiálů pro výrobu rezistorů [5, 8, 9] 1	9
Tab.	4: Tabulka časových konstant aproximovaných exponenciálních funkcí, které	
	popisují průběh oteplení rezistoru a maximální teplota, řádky odpovídají	
	jednotlivým pokusům	4
Tab.	5: Tabulka vypočtených koeficientů $\delta$ a C <sub>p</sub> , pro 3 vzorky rezistorů	5
Tab.	6: Tabulka vypočtených koeficientů pomocí skriptu, každý sloupec připadá k	
	danému rezistoru, řádky odpovídají jednotlivým pokusům	6
Tab.	7: Tabulka vypočtených koeficientů $d_{21}$ , $d_{31}$ a $d_a$ v [WK <sup>-1</sup> ] pomocí skriptu, řádky	
	odpovídají jednotlivým pokusům	8
Tab.	8: Tabulka vypočtených citlivostí na jednotlivé parametry modelu, při konstantní	
	amplitudě zatěžovacího impulsu4	0
Tab.	9: Tabulka citlivostí jednotlivých parametrů modelu na délce zatěžovacího impuls	u
	při konstantní energii = 2 J	1
Tab.	10: Tabulka maximálních dosažených teplot v různých částech rezistoru	
	v závislosti na délce pulsu, P = 196 W	3

## Seznam obrázků

Obr.	1: Popis zavedených veličin rezistoru u vrstvového rezistoru [Höft, 1983, str. 42]
Obr.	2: Průběh teploty rezistoru a) při odvodu tepla, b) při odvodu tepla a proudění23
Obr.	3: Graf zatížitelnost odporových drátů z nikelinu na keramické podložce [Mravec, str. 247]
Obr.	4: Pulsní zatížitelnost rezistorů při teplotě okolí 25 °C [2]
Obr.	5: Přístupy k modelování, červená barva představuje deduktivní přístup, modrá
	induktivní
Obr.	6: Buňka RC analogu
Obr.	7: Počítačový model rezistoru dle rovnice energetické bilance [Höft, 1983, s.38] 29
Obr.	8: Analogie vytvořeného modelu rezistoru
Obr.	9: Model rezistoru vytvořený v SIMULINKu
Obr.	10: Schéma měření oteplení při trvalém zatížení
Obr.	11: Znázornění velikosti průměru měřené plochy S na vzdálenosti
Obr.	12: Rezistor s pouzdrem typu 0414 [11]
Obr.	13: Průběh teploty při trvalém zatížení t <sub>on</sub> =3 s, t <sub>off</sub> =170 s
Obr.	14: Graf zobrazující naměřená data a jejich aproximaci pomocí programu
	MATLAB
Obr.	15: Graf závislosti citlivosti jednotlivých parametrů modelu na délce zatěžovacího
	impulsu při konstantní amplitudě I = 0,4 A 40
Obr.	16: Graf závislosti citlivosti jednotlivých parametrů modelu na délce zatěžovacího
	impulsu při konstantní energii = 2 J
Obr.	17: Maximální teplota jednotlivých částí rezistoru v závislosti na
Obr.	18: Typický průběh teploty při zatížení 192 W a délce pulsu 16 ms
Obr.	19: Schéma měřicí aparatury
Obr.	20: Zatěžovací impulsy
Obr.	21: Průběh napětí a proudu při nedestruktivním pulsu, $P=192$ W, $t_{on} = 50$ ms47
Obr.	22: Naměřený průběh teploty povrchu rezistoru při délce impulsu 50 ms
Obr.	23: Průběh napětí a proudu při destruktivním pulsu, $P = 192$ W, $t_{on} = 100$ ms 48
Obr.	24: Detailní průběh napětí a proudu při pulsu, který rezistor již poškozuje, t <sub>on</sub> =
	100 ms
Obr.	25: Graf velikosti maxima odporu v závislosti na délce zatěžovacího pulsu, P= 192
	W
Obr.	26: Fotografie měřeného rezistoru s vyznačením místa poškozením
Obr.	27: Průběh napětí a proudu při pulsu $t_{on} = 10 \text{ ms}, \dots, 50$

## Seznam použitých symbolů

a	m	šířka vybroušené drážky
b	m	šířka odporové dráhy
c	JK <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	měrná tepelná kapacita
c <sub>d</sub>	JK <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	měrné teplo odporového drátu
c <sub>p</sub>	JK <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>	měrné teplo podložky
С	JK <sup>-1</sup>	tepelná kapacita
$C_p$	JK <sup>-1</sup>	tepelná kapacita rezistoru
$C_{p1}$	JK <sup>-1</sup>	tepelná kapacita odporové vrstvy
$C_{p2}$	JK <sup>-1</sup>	tepelná kapacita izolační vrstvy
$C_{p3}$	JK <sup>-1</sup>	tepelná kapacita keramického tělíska
d	m	průměr válcového rezistoru
d <sub>21</sub>	WK <sup>-1</sup>	koeficient přestupu tepla mezi odporovou izolační vrstvou
d <sub>31</sub>	$WK^{-1}$	koeficient přestupu tepla mezi odporovou vrstvou a keramickým
		tělískem
$d_a$	$WK^{-1}$	koeficient přestupu tepla mezi izolační vrstvou a okolím
e		je emisivita tělesa
g	m	stoupání = $a+b$
$\mathbf{G}_{\mathbf{p}}$		polohový činitel
Ι	А	elektrický proud
1	m	délka odporové dráhy
ls	m	délka vinutí na izolačním tělísku
m	kg	hmotnost
р	Pa	tlak vzduchu
$p_0$	Pa	normální tlak vzduchu
$P_N$	W	maximální výkonové zatížení
r <sub>c</sub>	m	poloměr tělesa odporu
r <sub>D</sub>	m	poloměr odporového drátu
R	Ω	elektrický odpor
S	m	tloušťka odporové dráhy
s <sub>D</sub>	$m^2$	průřez odporového materiálu
S	$m^2$	plocha tělesa

$S_P^Y$	[-]	citlivostní funkce
t	S	čas
ton	S	doba zatížení rezistoru
U	V	elektrické napětí
v	m	rozteč sousedních závitů
V	m <sup>-3</sup>	objem
W	J	elektrická práce
$W_L$	J	energie uložená v indukčnosti
α	$Wm^{-2}K^{-1}$	je činitel přestupu tepla
δ	$WK^{-1}$	koeficient přestupu tepla = $\alpha$ .S
$\Delta \vartheta_m$	К	maximální dovolené oteplení rezistoru
λ	$Wm^{-1}K^{-1}$	je tepelná vodivost
$\lambda_p$	$Wm^{-1}K^{-1}$	měrná tepelná vodivost podložky
σ	$Wm^{-2}K^{-4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta = $5,670400 \times 10^{-8}$
ρ	$\Omega m$	měrný elektrický odpor
$ ho_m$	kgm <sup>-3</sup>	objemová hustota
θ	°C	teplota rezistoru
$\vartheta_{A}$	°C	teplota okolního prostředí
$\vartheta_{\rm max}$	°C	maximální dovolená teplota rezistoru
$ au_{\upsilon}$	S	tepelná časová konstanta rezistoru

#### 1. Úvod

Při konstrukci některých elektronických zařízení je zapotřebí správně navrhnout maximální jmenovité zatížení rezistoru, a tím i jeho vhodný výběr z řady typických hodnot, které výrobci vyrábějí. Tato práce se zabývá případem rezistoru, který pracuje v krátkodobém zatížení. V případě volby nízké hodnoty maximálního jmenovitého výkonu dojde k destrukci rezistoru a tím i k možné poruše celého elektronického zařízení, kterého je součástí. Lepší volbou je navrhnutí rezistoru s vyšší hodnotou maximálního jmenovitého zatížení, kdy nemůže dojít k destrukci vlivem přetížení, ale jsou tu jiné nevýhody, které s tím jsou spojené. S velikostí maximálního jmenovitého výkonu rostou i rozměry rezistorů a jeho hmotnost, s touto skutečností se musí počítat při návrhu elektronického obvodu. Rezistory s vysokým maximálním jmenovitým výkonem jsou také drahé, což může hrát v konečné ceně celého výrobku a jeho uplatnění na trhu velkou roli. Správné určení maximálního jmenovitého výkonu použitého rezistoru ušetří tedy zastavěný prostor, hmotnost a cenu.

Typickým příkladem použití je stupňový spouštěč transformátoru nebo asynchronního motoru, který omezuje zapínací resp. rozběhový proud. Motivací k této práci byl právě návrh stupňového spouštěče, který jsem řešil jako bakalářský projekt. Stupňový spouštěč omezoval zapínací proud třífázového transformátoru o výkonu 40 VA, který při zapínání předčasně vybavoval jističe. Transformátory byly zabudovány v laboratorních stolech v učebnách EL1 a EL2 Technické univerzity v Liberci. Navrhnutý stupňový spouštěč jsem vyrobil ve 20 kusech a jsou zapojeny před zmíněnými transformátory.

Výrobci rezistorů uvádějí ve svých katalogových listech informace většinou v podobě grafu o možném přetížení vzhledem ke krátké době zatěžovacího pulsu jen u speciálních výkonových rezistorů [1, 2]. U rezistorů s nižším maximálním jmenovitým výkonem však již tuto informaci většinou neposkytují [1]. Nebo častěji udávají informace o přetížení vzhledem k délce zatěžovacího pulsu vztaženého k periodě [2]. Tato hodnota zatížení odpovídá přerušovanému ne však krátkodobému chodu. Při návrhu elektronických zařízení tato absence informací může způsobovat potíže vedoucí k nevhodnému návrhu použitého rezistoru.

První část této práce se zabývá teoretickou částí navrhování rezistorů při dané zátěži, která je uvedena v použité literatuře. Další část se věnuje počítačovému modelu rezistoru pro zjištění průběhu oteplení při impulsním zatížení. Po návrhu modelu je

nutné určit jednotlivé parametry modelu tak, aby vyhovoval zkoumanému rezistoru. Dále následuje simulace průběhu teploty při zatížení pro různé délky zatěžovacího pulsu. Tyto výsledky jsou porovnány s hodnotami získanými z měření.

#### 2. Teorie používaná při návrhu rezistorů

#### 2.1 Maximální teplotní zatížení rezistorů

Maximální zatížení rezistorů je dáno dovoleným oteplením rezistoru, které je uvedeno v katalogu a množstvím energie, kterou za sledovaný čas rezistor odevzdá okolí.

#### 2.2 Formy energie ovlivňující rezistor

Podle Höfta [3] lze rozdělit formy energie do následujících skupin.

a) Teplo vzniklé přeměnou z elektrické energie

Průchodem proudu vodičem odevzdávají částice, které jsou nosičem elektrického náboje, část svojí kinetické energie ostatním částicím. Dojde tak ke zvýšení neuspořádaného pohybu těchto částic a tedy i ke zvýšení vnitřní energie, která se projeví změnou teploty.

$$W = \int UIdt \tag{1}$$

b) Teplo spotřebované oteplením materiálu bez změny skupenství

$$W = \int C d\vartheta \tag{2}$$

C je tepelná kapacita tělesa

 $\vartheta$  je teplota tělesa

c) Odvod tepla pohybem okolních částic

Konvekce tepla se uplatňuje pouze u kapalin a plynů. Teplo se přenáší přenosem částic a tedy i hmoty mezi místy s různou teplotou.

$$W = \iiint \alpha \cdot d\vartheta \cdot dS \cdot dt \tag{3}$$

 $\alpha$  je činitel přestupu tepla

S je povrch tělesa

Činitel přestupu tepla je určen konstrukcí rezistoru a materiály, ze kterých je vyroben. Je ovlivněn také okolní teplotou a intenzitou proudění vzduchu. Podle Höfta [3] lze tento teplotní činitel určit takto.

$$\alpha[W/m^2K] = G_p d^{-0.38} \cdot (\vartheta - \vartheta_a)^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{p}{p_0}}$$
(4)

- G<sub>p</sub> je polohový činitel
- d průměr válcového rezistoru
- $\vartheta_A$  je teplota okolí
- p tlak vzduchu
- p<sub>0</sub> normální tlak vzduchu

Tento vztah lze použít za podmínek: p< p<sub>0</sub>, v= 150 až 200 °C, d= 0,4 až 4.10<sup>-2</sup> m. Velikost G<sub>p</sub> závisí na poloze součástek vůči základní desce.

#### d) Vedení tepla

Při odvádění tepla pomocí kondukce se teplo převádí prostřednictvím srážek částic. Částice se nepřemisťují, ale kmitají okolo své rovnovážné polohy. Předávání tepla pomocí kondukce se nejvíce uplatňuje v pevných látkách.

$$W = \iint \lambda \, \frac{\partial \,\vartheta}{\partial r} \, dS dt \tag{5}$$

 $\lambda$  je tepelná vodivost

e) Vyzařování tepla do okolí

Sálání je proces, při němž látka do okolního prostoru vyzařuje energii.

$$W = e\sigma \iint \vartheta^4 dS dt \tag{6}$$

 $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta

e je emisivita tělesa

#### 2.3 Rovnice energetické bilance

Podle zákona zachování energie se musí rovnat dodaná energie energii spotřebované. Následující rovnice (7) popisuje energetickou bilanci rezistoru. Na levé straně rovnice je dodaná tepelná energie, jejíž zdroj je protékaný proud. Na pravé straně jsou pak členy, v nichž se teplo spotřebovává zvýšením teploty rezistoru, konvencí, vedením a zářením. Všechny členy rovnice mají rozměr energie s jednotkou watt.

$$\int U \cdot I \cdot dt = \int C d\vartheta + \iiint \alpha \cdot d\vartheta \cdot dS \cdot dt + \iint \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} dS dt + e\sigma \iint \vartheta^4 dS dt \quad (7)$$

Diferenciální rovnice (8) popisuje vývoj teploty uprostřed rezistoru vzhledem k velikosti procházejícího proudu, okolní teplotě, hodnotě odporu a dalším vlastnostem rezistoru. Tato rovnice zanedbává ztráty tepla vedením. Je předpokládáno, že vodiče, jimiž je rezistor připojen k základní desce, mají menší průřez než rezistor. Nevytvoří se tedy velký teplotní spád. Dále tato rovnice zanedbává vyzařování tepla, protože se nepředpokládají vysoké pracovní teploty. Tato úvaha značně zjednodušuje popis vývoje tepla uvnitř rezistoru. Po vyřešení této rovnice dostaneme průběh teploty rezistoru v čase, z toho můžeme usoudit, jak lze rezistor poddimenzovat vzhledem k době zatížení.

Určení konstant  $\alpha$  a C<sub>p</sub> může být obtížné, lze však použít následující postup [Höft, 1983, s. 38], kde pomocí reálné součástky můžeme určit tyto konstanty. Tento postup však zanedbává některé členy rovnice energetické bilance a hodí se spíše pro popis při trvalém zatížení.

$$R \cdot i^{2} \cdot dt = C_{p} \cdot d\vartheta + \delta \cdot (\vartheta - \vartheta_{A}) \cdot dt$$
(8)

 $C_p$  je tepelná kapacita rezistoru  $\delta = \alpha.S$  je koeficient vyzařování  $\lambda$  je tepelná vodivost  $\vartheta$  je teplota rezistoru  $\vartheta_A$  je teplota okolí

Z řešení diferenciální rovnice energetické bilance vyplývá časová konstanta  $\tau_{v}$ , která je dána vztahem (9).

$$\tau_{\vartheta} = \frac{C_p}{\delta} = \frac{c \cdot \rho \cdot V}{\alpha \cdot S} \tag{9}$$

Pro ustálenou hodnotu teploty (t $\rightarrow \infty$ ) platí následující vztah (10), kde P<sub>N</sub> je nejvyšší dovolené zatížení.

$$\vartheta_{\max} - \vartheta_0 = \Delta \vartheta_m = \frac{P_N}{\delta}$$
(10)

Po dosazení do rovnice (8) vznikne diferenciální rovnice (11).

$$\delta \cdot (\vartheta_{\max} - \vartheta_0) = \delta \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + C_p \frac{d\vartheta}{dt}$$
(11)

$$dt = \tau_{\nu} \frac{d\vartheta}{\vartheta_{\max} - \vartheta}$$
(12)

Řešením této rovnice je ve tvaru (13).

$$\vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_{\max} - \vartheta_0) \cdot \left(1 - e^{\frac{-t - t_0}{\tau_{\vartheta}}}\right)$$
(13)

Pro určení konstant  $\alpha$  a C<sub>p</sub> je nutné vyjádřit první derivaci předcházející funkce popisující průběh teploty.

$$\Delta \vartheta'|_{t=0} = \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_0}{\tau_v} = \frac{\Delta \vartheta_m}{\tau_v}$$
(14)

$$\Delta \vartheta'|_{t=0} = \frac{\Delta \vartheta_m \cdot \delta}{C_p} = \frac{P_N}{C_p}$$
(15)

Z porovnání předcházejících úprav první derivace dané funkce můžeme vyjádřit teplotní časovou konstantu pomocí koeficientu  $\delta$ . Předpokladem je, že rezistor má válcovitý tvar o průměru *d*. Dále se předpokládá, že je rezistor tvořen z jednoho materiálu, který tvoří jeho majoritní část, z důvodu určení měrné tepelné kapacity a objemové hustoty.

$$\frac{\Delta \vartheta_m}{\tau_v} = \frac{P_N}{C_p} \tag{16}$$

$$\tau_{\vartheta} = c \cdot m \cdot \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta_0}{P_N} \tag{17}$$

$$\tau_{\vartheta} = \frac{c \cdot \rho_m}{4 \cdot \delta} \cdot d \tag{18}$$

$$\delta = \frac{c \cdot \rho_m}{4 \cdot \tau_\vartheta} \cdot d \tag{19}$$

Hromadně vyráběné rezistory o průměru 3 až 20 mm mají tepelnou časovou konstantu většinou v rozmezí 30 až 300 s. Tepelnou kapacitu rezistoru lze dopočítat

dosazením koeficientu vyzařování vypočteného z činitele přestupu tepla a plochy rezistoru.

#### 2.4 Typické hodnoty koeficientů v rovnici energetické bilance

materiál	c [W s kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
keramika	420-920
cement	870-1040
poleva	600-800
odporové vrstvy	120-600

Tab. 1: Měrné teplo materiálů pro výrobu rezistorů [Heft, 1983, str. 39]

materiál	teplota [°C]	e [-]
černý lak	93	0,96
čirý lak na lesklé mědi	93	0,66
čirý lak na matné mědi	93	0,64
bílý lak	93	0,95
modrý nátěr Cu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24	0,94
černý nátěr CuO	24	0,96
zelený nátěr Cu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24	0,92
červený nátěr Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24	0,91
bílý nátěr MgO	24	0,91
žlutý nátěr PbO	24	0,90
bílá keramika glazurovaná	21	0,90
porcelán	22	0,92
hliník	100	0,03
měď leštěná	38	0,03

Tab. 3:Tabulka tepelné vodivosti materiálů pro výrobu rezistorů [5, 8, 9]

materiál	$\lambda$ [Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
grafit	67
měď	401
hliník	237
železo	80
nikl	91
zinek	116
chrom	93,7
mangan	7,8
keramika	1,5
nikelin	80
mosaz 40% Zn	90
chromnikl 20% Cr, 80% Ni	60

#### 2.5 Rozložení teploty v rezistoru

Teplota v rezistoru není konstantní. Teplotu v daném místě ovlivňuje vzdálenost od přívodních vodičů, které rezistor ochlazují, a poloha rezistoru vzhledem k proudění vzduchu. Podle [Höft, 1983, s.41] lze určit teplotu v libovolném bodě x rezistoru o konstantním průřezu *S* následovně podle vzorce (20).

$$\frac{dW_L}{dt} = P_{L(x)} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dt}{dx}$$
(20)

W<sub>L</sub> je energie v indukčnosti

S průřez rezistoru

Ve vzdálenosti x + dx platí s využitím Taylorovy řady (22) a předpokladu dv < 0.

$$P_{L(x+dx)} = P_L + \frac{\partial P_{L(x)}}{\partial x} dx$$
(21)

$$P_{L(x+dx)} = \lambda \cdot S \cdot \frac{d(\vartheta - d\vartheta)}{dx}$$
(22)

Teplotní gradient má tvar (23) a teplotní tok je (24).

$$\frac{d}{dx}(\vartheta - d\vartheta) = \frac{d\vartheta}{dx} + \frac{d^2\vartheta}{dx^2}dx$$
(23)

$$P_{L(x)} - P_{L(x+dx)} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d^2 t}{dx^2} dx$$
(24)

Po porovnání dodávaného příkonu s tepelným tokem (odevzdaný výkon) vznikne diferenciální rovnice (25).

$$I^{2} \frac{dR}{dx} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d^{2} \vartheta}{dx^{2}}$$
(25)



Obr. 1: Popis zavedených veličin rezistoru u vrstvového rezistoru [Höft, 1983, str. 42] a) vybroušené odporové tělísko, b) rozvinutá odporová dráha

r <sub>c</sub>	je poloměr tělesa odporu
ls	délka vinutí na izolačním tělísku
g = a + b	stoupání
a	šířka vybroušené drážky
b	šířka odporové dráhy

V případě drátového nebo vrstvového rezistoru lze odpor vyjádřit pomocí měrné rezistivity, délky a průřezu odporového materiálu (26).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s_D} = \rho \cdot \frac{x}{s_D \cdot \sin \alpha}$$
(26)

ρ rezistivita

*l* délka odporové dráhy

*s*<sub>D</sub> průřez odporového materiálu

Pro drátový rezistor lze průřez vyjádřit podle vzorce (27), pro vrstvový rezistor pak platí vztah (28).

$$s_D = \pi \cdot r_D^2 \tag{27}$$

## $r_D$ poloměr odporového drátu

$$s_D = s \cdot b \cdot \cos \alpha \tag{28}$$

*b* šířka odporové dráhy

s tloušťka odporové dráhy

Přírůstek odporu za jednotku délky po dosazení průřezu pro vrstvový rezistor (29) lze napsat následovně (30).

$$\frac{dR}{dx} = \frac{\rho}{s_D \cdot \sin \alpha} = \frac{\rho}{s \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha}$$
(29)

$$\cos\alpha\sin\alpha = \frac{2\pi \cdot r_c \cdot g}{g^2 + (2\pi \cdot r_c)^2}$$
(30)

 $r_c$  je poloměr tělesa odporu

g stoupání šroubovice

Průřez keramického tělíska je dán rovnicí (31).

$$S = \pi \cdot r_c^2 \tag{31}$$

Po dosazení průřezu a přírůstku odporu na jednotku délky do diferenciální rovnice porovnávající odevzdaný výkon s příkonem (20) má tato rovnice tvar (32).

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{-I^2\rho(g^2 + 4\pi^2 r_c^2)}{2s \cdot b \cdot \pi^2 \cdot r_c^3 \cdot \lambda \cdot g} = -K_1$$
(32)

Řešení této diferenciální rovnice má obecný tvar (33).

$$\vartheta = -0.5 \cdot K_1 \cdot x^2 + K_2 \cdot x + K_3 \tag{33}$$

Okrajovou podmínkou této rovnice je teplota vývodů rezistoru, které mají teplotu  $v_K$  pro x = 0 a  $x = l_s$ . Tím jsou určeny konstanty  $K_2$  a  $K_3$ .

$$K_3 = \vartheta_K \tag{34}$$

$$K_2 = 0, 5 \cdot K_1 \cdot l_s \tag{35}$$



Obr. 2: Průběh teploty rezistoru a) při odvodu tepla, b) při odvodu tepla a proudění ve vodorovné poloze, c) při odvodu tepla a proudění ve svislé poloze [3]

Z Obr. 2 můžeme vidět, že nejvyšší teplota je v závislosti na umístění rezistoru poblíž středu rezistoru.

#### 2.6 Dimenzování rezistoru jako volné šroubovice

Při návrhu rezistoru, který má sloužit například jako jeden stupeň stupňového spouštěče, se využije tepelné kapacity odporového drátu, který se během krátkého zatížení nestačí ochlazovat okolním prostředím. Elektrická energie se přemění na tepelnou energii a může tak dojít k oteplení až na maximální teplotu rezistoru.

$$W = C_p \cdot \Delta \vartheta_{\max} \tag{36}$$

$$R \cdot I^2 \cdot t = S \cdot l \cdot c \cdot \Delta \vartheta_{\max} \tag{37}$$

Čas provozu *t* rezistoru, odpor *R* a stejně tak jako zatěžovací proud *I* je dán konkrétním použitím. Měrná tepelná kapacita *c* a maximální oteplení  $\Delta v_{max}$  je určeno volbou materiálu, ze kterého je vyroben odpor. Parametry, které je nutno dopočítat, jsou tedy průřez odporového vodiče *S* a jeho délka *l*.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \tag{38}$$

$$\rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 \cdot t = S \cdot l \cdot c \cdot \Delta \vartheta_{\max}$$
(39)

$$S = \sqrt{\frac{\rho \cdot I^2 \cdot t}{c \cdot \Delta \vartheta_{\max}}} \tag{40}$$

Po výpočtu průřezu a jeho zaokrouhlení na normalizovanou hodnotu se dopočítá délka odporového vodiče.

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} \tag{41}$$

# 2.7 Dimenzování rezistoru jako šroubovice navinuté na keramické podložce

Určení celkové tepelné kapacity rezistoru je velmi obtížné, jedná se totiž o časově i prostorově proměnný jev. Odporový drát a přívodní vodiče se podílejí na tepelné kapacitě zcela, zatímco podložka popř. náplně a povrchová úprava rezistoru se na tepelné kapacitě podílejí jen z části, pokud ztrátové teplo stihnou přijmout za dobu provozu rezistoru.

Při navíjení odporového drátu na keramické tělísko dojde ke zvýšení tepelné kapacity rezistoru a toto řešení umožní použití odporového vodiče o menším průřezu.

Maximální zatížení, které lze u rezistoru použít, je dáno vztahem (42) podle [Mravec, 1982, str. 246].

$$I = \sqrt{\frac{\Delta \vartheta_{\max}}{\rho}} \left( S \cdot v \sqrt{\frac{\pi \lambda_p c_p}{4t}} + \frac{c_d S^2}{t_{on}} \right)$$
(42)

- $\lambda_p$  měrná tepelná vodivost podložky
- c<sub>p</sub> měrné teplo podložky
- c<sub>d</sub> měrné teplo odporového drátu
- ρ rezistivita odporového drátu
- v rozteč sousedních závitů
- $t_{on} \qquad doba \ zatí {\check z} en {i} \ rezistoru$



Obr. 3: Graf zatížitelnost odporových drátů z nikelinu na keramické podložce [Mravec, str. 247], jednotlivé datové řady přísluší daným průměrům odporového drátu ve stejném pořadí

#### 2.8 Dimenzování rezistoru s využitím katalogového listu výrobce

Někteří výrobci speciálních rezistorů uvádějí v katalogových listech příslušných výrobků grafy zatížitelnosti rezistorů vzhledem k délce impulsu nebo k poměru doby zatěžovacího pulsu k době periody. Údaj vztažený k poměru doby zatěžovacího pulsu nám však udává velikost opakovatelného zatížení, které bude nižší než při zatížení jen jedním pulsem. Lze tak při znalosti potřebné délky impulsu, která je určena danou aplikací, odečíst jak lze rezistor poddimenzovat. U rezistorů s nižším jmenovitým výkonem se však tyto grafy běžně neuvádí.

Na Obr.4 je zobrazen graf pulsní zatížitelnost brzdné soustavy rezistorů s jmenovitým výkonem 2 kW při teplotě okolí 25 °C, které vyrábí Tesla Blatná, a. s. Na vodorovné ose je vynesen poměr doby zatěžovacího pulsu k době periody (pro typickou dobu periody 100 až 120 s). Na svislé ose je vynesen poměr maximálního výkonu během dané doby zatěžovacího pulsu k celkovému jmenovitému zatížení sestavy rezistorů. Obě osy mají logaritmické měřítko. Jednotlivé vynesené křivky popisují možnost zatížení rezistoru při různě velkém adiabatický impuls, který je označen jako  $W_{ad}$ .



Obr. 4: Pulsní zatížitelnost rezistorů při teplotě okolí 25 °C [2]

#### 2.9 Tepelný proces a jeho model

Při řešení tepelných procesů se nejčastěji setkáme s řízeným oteplováním nebo ochlazování materiálu. V některých teplotních procesech nedochází ke změnám skupenství. Při řešení návrhu rezistoru při mžikovém zatížení, by také nemělo docházet ke změnám skupenství. Většinou je hlavním požadavkem optimálně řízený tepelný proces v celém systému nebo v jeho části. Optimalizační úlohy, které řeší tepelný proces, patří mezi nejsložitější a jejich řešení může být velmi obtížné. Řešení tepelných úloh většinou vede na systém s rozloženými parametry, které mohou být obtížně řešitelné. Ve složitých technologických procesech se mohou stát až neřešitelné. Základní postup řešení systému s rozloženými parametry vede na vhodnou transformaci a analýzu tepelného systému. Z fyzikálního hlediska se pro zjednodušení systému s rozloženými parametry. Tento systém je popsán obyčejnými diferenciálními rovnicemi, jejichž řešení je o poznání lehčí.

Modely tepelných procesů lze rozdělit na abstraktní a simulační. Abstraktní model se často nazývá matematickým modelem a bývá omezen okrajovými, počátečními a omezujícími podmínkami. Simulační model je model, který je realizován pomocí technických prostředků. Jestliže je technickým prostředkem počítač, tak se tento model nazývá počítačovým modelem.

Existují dva přístupy k modelování deduktivní a induktivní. Deduktivní přístup pomocí matematicko-fyzikální analýzy vede nejdříve na sestavení matematického modelu z něhož se sestaví model simulační. Při tomto postupu musíme znát vnitřní strukturu zkoumaného systému. Při induktivním přístupu se pomocí měření a identifikace vytvoří simulační model, z něhož můžeme určit model matematický. Z tohoto pohledu je pro nás model většinou "černou skříňkou" a neznáme jeho vnitřní strukturu.



Obr. 5: Přístupy k modelování, červená barva představuje deduktivní přístup, modrá induktivní

Při identifikaci systému tak dále nastává problém s měřením chování modelu a jeho přesnosti. V případě tepelných procesů se jedná nejčastěji o teploty některých částí systému. Při měření teplot je potřeba vycházet z charakteru systému a z cíle tepelné úlohy, kterou model řeší. Je nutno vybrat vhodný typ čidla s danou přesností a jeho umístění v tepelném systému.

Identifikace v tepelném experimentu je proces, který pomocí měření vede na sestavení matematického modelu a jemu odpovídající simulačnímu modelu.

#### 2.10 Analogy v tepelných procesech

Při řešení tepelných procesů lze využít řadu fyzikálně-matematických modelů, které využívají matematické podobnosti s vedením tepla. Mezi tyto analogy patří

elektrotepelná, elektrochemická, hydrodynamická, hydraulická, membránová, třecí a další.

Největší význam má analogie elektrotepelná, která využívá podobností mezi vedením tepla a elektrického proudu. Tepelný proces se u neustálených dějů převádí na časově RC analogy. Jedná se tedy o síť sestávající se z rezistorů, kondenzátorů a proudových zdrojů. Síť je tvořena buňkami, které mají již konstantní parametry. Množstvím buněk, ze kterých je sestavena síť, lze realizovat buď analog se soustředěnými parametry či s konstantními parametry. Napětí v buňce odpovídá teplotě v daném místě. Při fyzikální realizaci záleží přesnost analogu na přesnosti použitých součástek a především kondenzátorů. Cena fyzikální realizace není závratná a výhodou je snadná změna fyzikálního modelu. V dnešní době již není problém vytvořit pomocí speciálních programů pro simulaci v elektrotechnice virtuální RC síť a sledovat tak průběhy teplot. Při matematické realizaci výpočtu pak řešení vede na soustavu algebraických rovnic pomocí Kirchhoffových zákonů, většinou se však s výhodou využívá metody uzlových napětí.



Obr. 6: Buňka RC analogu

Hydraulická analogie používá analogii mezi vedením tepla a laminárním průtokem kapaliny v systému složeném z hydraulických odporů a kapacit. Tento analog je většinou znázorňován jako soustavou svislých zásobníků spojených na spodním konci trubičkami. Tento přístup je při fyzikální realizaci poněkud těžkopádný a má menší přesnost. Jeho největší předností je bezprostřednost a jednoduché vyjádření tepelné kapacity a odporů.

#### 3. Model rezistoru

#### 3.1 Model rezistoru vycházející z [Höft, 1983, s.38]

Uvedený model vychází ze zjednodušené rovnice energetické bilance (43). Tento model průběhu oteplení rezistoru v závislotsti na zatížení poměrně dobře popisuje oteplení při trvalém zatížení. Při mžikovém zatížení se však již tento model nedá použít, protože nebere v úvahu tepelné kapacity jednotlivých částí rezistoru a koeficienty přestupu mezi těmito částmi.

$$R \cdot i^{2} \cdot dt = C_{p} \cdot d\vartheta + \delta \cdot (\vartheta - \vartheta_{A}) \cdot dt$$
(43)

Obr. 7: Počítačový model rezistoru dle rovnice energetické bilance [Höft, 1983, s.38]

Model rezistoru jsem vytvořil v programu MATLAB a jeho nadstavby SIMULINK. K jeho realizaci jsem použil základní stavební bloky, které tato nadstavba obsahuje. Vstupní parametry modelu jsou koeficienty uvedené ve zjednodušené rovnici energetické bilance. Výstupem modelu je teplota rezistoru.

#### 3.2 Navržený model rezistoru

Pro zjištění průběhu teploty rezistoru jsem po konzultacích vytvořil jednoduchý počítačový model rezistoru, který je popsán soustavou obyčejných diferenciálních rovnic. Tento model využívá induktivního přístupu k modelování a má koncentrované parametry. Vytvořený model je prvním přiblížením, pro přesnější určení teplot

v rezistoru by bylo nutné vytvořit komplexnější model popsaný parciálními diferenciálními rovnicemi.

Rezistor je pro tento model rozdělen na tři části, první část je tvořena odporovou vrstvou, druhá část reprezentuje nosné keramické tělísko a poslední třetí část je vrstva tvořící izolaci odporové vrstvy od okolí. Navržený model je popsán pomocí analogie zásobníků vnitřní energie, které jsou propojené kanálem s omezením tepelného toku daným přestupem tepla mezi jednotlivými vrstvami rezistoru. Jednotlivé části rezistoru jsou reprezentovány zásobníky s tepelnou kapacitou. Výměna tepla mezi jednotlivými částmi rezistoru je realizována kanály s omezením průtoku energie. Zdrojem tepelné energie je elektrický proud, který prochází rezistorem. Odpor rezistoru je v tomto modelu konstanta, protože v aplikaci např. pro stupňový spouštěč je změna odporu rezistoru v závislosti na teplotě nepodstatná. Všechny ostatní prvky jsou spotřebiči energie. Dodaná energie se tedy spotřebuje na oteplení jednotlivých vrstev rezistoru a odvodem tepla do okolí.



Obr. 8: Analogie vytvořeného modelu rezistoru

$$R \cdot i^2 - C_{p1} \frac{d\vartheta_1}{dt} - \delta_{21}(\vartheta_1 - \vartheta_2) - \delta_{31}(\vartheta_3 - \vartheta_1) = 0$$
(44)

$$\delta_{21}(\vartheta_1 - \vartheta_2) - C_{p2} \frac{d\vartheta_2}{dt} - \delta_A(\vartheta_3 - \vartheta_A) - e \cdot \sigma \cdot S \cdot \vartheta_2^4 = 0$$
(45)

$$\delta_{31}(\vartheta_3 - \vartheta_1) - C_{p3} \frac{d\vartheta_3}{dt} = 0 \tag{46}$$

Model umožňuje nastavení jednotlivých parametrů, které se vyskytují ve výše uvedených diferenciálních rovnicích a jsou zde jako vstupy modelu. Výstupy modelu jsou průběhy teplot jednotlivých vrstev rezistoru a čas.



Obr. 9: Model rezistoru vytvořený v SIMULINKu

#### 3.3. Měření oteplení při trvalém zatížení

Při měření průběhu teploty při trvalém zatížení lze odhadnout pomocí identifikace hodnoty parametrů ve vytvořeném modelu, který pak bude využit pro simulaci průběhu oteplení při mžikovém zatížení.

Měřicí soustava se skládala z laboratorního zdroje stejnosměrného napětí HY3020, pyrometru GIM 3590 a zkoumaného rezistoru.

Pyrometr měří pouze povrchovou teplotu, pro přesnější identifikaci hodnot parametrů ve vytvořeném modelu by bylo zapotřebí měřit teploty jednotlivých vrstev. To by vyžadovalo odstranění části izolační a odporové vrstvy, vzhledem k jejich malé tloušťce by to však bylo značně komplikované. Zvlášť obtížné by bylo odstranit izolační vrstvu a zároveň nepoškodit odporovou vrstvu, která má tloušťku jen 2 μm.



Obr. 10: Schéma měření oteplení při trvalém zatížení

#### 3.3.1. Pyrometr GIM 3590

Výhodou použitého pyrometru je možnost měření objektů o velikosti od 1 mm při vhodném módu a vzdálenosti předmětu od pyrometru, jak je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 11: Znázornění velikosti průměru měřené plochy S na vzdálenosti předmětu od pyrometru D [10]

Emisivitu rezistoru jsem orientačně určil pomocí odparu vody při zatíženým rezistoru. Postupně jsem měnil emisivitu tak, aby v okamžiku, kdy teplota vody na povrchu rezistoru dosáhla bodu varu a došlo ke krátkodobému zastavení jejího růstu, než se voda zcela odpařila, ukazoval pyrometr 100 °C. Emisivitu jsem takto určil na hodnotu 0,945 u metalizovaného rezistor 2W, velikost 0414. Použitý pyrometr lze pomocí USB kabelu připojit k počítači. Software umožňuje uložení naměřených hodnot do formátu, který lze dále zpracovávat. Rozlišení tohoto pyrometru je 0,1 °C a reakční čas má hodnotu 150 ms.

#### 3.3.2 Použitý typ rezistoru

Z velké řady rezistorů, které jsou v dostání na trhu, jsem vybral jako vzorek metal oxidový rezistor o odporu 100  $\Omega$ . Nejvyšší jmenovitý výkonu rezistoru je 2 W a typový označením jeho pouzdra je 0414. Tento rezistor má toleranci 5 % a teplotní součinitel odporu má hodnotu 300 ppm/K. Katalogový list je uveden v [11], rozměry rezistorů jsou uvedeny na Obr. 12.



Obr. 12: Rezistor s pouzdrem typu 0414 [11]

#### 3.3.3 Vlastní měření oteplení

Teplotu rezistoru jsem měřil pyrometrem GIM 3590, který jsem pomocí USB kabelu připojil k PC. Rezistor jsem pomocí speciálních svorek zafixoval ke stojánku, kde byl připevněn i pyrometr tak, aby byla zajištěna konstantní vzdálenost pyrometru a rezistoru během celé doby měření. Vzdálenost měřeného rezistoru a pyrometru jsem nastavil tak, aby rozlišení pyrometru bylo 1 mm. Rezistor jsem připojil k laboratornímu zdroji s nastaveným výstupním napětím 15 V ve třetí sekundě po spuštění softwaru, který zajišťuje záznam naměřených hodnot teploty povrchu rezistoru do počítače. Odpojení rezistoru od zdroje jsem provedl po uplynutí 170 sekund, kdy docházelo již k ustálení teploty rezistoru. Software, který je dodáván k použitému pyrometru, ukládá naměřená data do souboru typu \*.dat.

Provedl jsem měření na třech náhodně vybraných rezistorech stejného typu a na každém z nich jsem provedl měření třikrát. Typický průběh teploty je zobrazen na Obr. 13.



Obr. 13: Průběh teploty při trvalém zatížení t<sub>on</sub>=3 s, t<sub>off</sub>=170 s

#### 3.4 Identifikace parametrů

#### 3.4.1 Identifikace parametrů zjednodušené rovnice energetické bilance pomocí časové konstanty

Pro určení tepelné časové konstanty, která je nutná pro výpočet tepelné kapacity a koeficientu vyzařování, bylo nutné naměřené průběhy aproximovat a matematicky popsat. Průběh oteplení jsem aproximoval exponenciální funkcí s dopravním zpožděním. Časovou konstantu jsem položil rovnu době, která uplyne od skončení doby průtahu do doby potřebné k nárůstu resp. k poklesu teploty na 63 % maximální dosažené teploty. Tuto aproximaci systémem prvního řádu jsem volil pro přesnější popis časového průběhu, jak je uvedeno v [Åström & Hägglund, 1995].

Konkrétní hodnoty časových konstant popisující průběh oteplení, chladnutí a maximální dosažené teploty jsou uvedeny v Tab. 4.

	vzorek no.1				vzorek no.2			vzorek no.3		
	t <sub>up</sub> [s]	t <sub>down</sub> [s]	υ <sub>max</sub> [℃]	t <sub>up</sub> [s]	t <sub>down</sub> [s]	υ <sub>max</sub> [℃]	t <sub>up</sub> [s]	t <sub>down</sub> [s]	υ <sub>max</sub> [℃]	
Ι.	28,26	34,4	192,8	28,88	36	187,2	28,6	35,7	179,0	
II.	28,66	34,1	191,3	29,3	36,2	189,1	28,22	35,7	179,2	
III.	28,16	33,7	190,3	29,9	36,3	190,7	27,84	35,5	179,5	
průměr	28,4	34,0	192	29,4	36,2	189	28,2	35,6	179	

Tab. 4: Tabulka časových konstant aproximovaných exponenciálních funkcí, které popisují průběh oteplení rezistoru a maximální teplota, řádky odpovídají jednotlivým pokusům

Z průměrných hodnot časových konstant jsem podle vzorce (47) a (48) dopočítal koeficient vyzařování tepla a tepelnou kapacitu jednotlivých rezistorů.

$$\delta = \frac{C_p}{\tau_{\vartheta}} = \frac{P_N \cdot \tau_{\vartheta}}{\Delta \vartheta_m \cdot \tau_{\vartheta}} = \frac{P_N}{\Delta \vartheta_m} = \frac{2}{191,5} = 0,0104WK^{-1}$$
(47)

$$C_{p} = \frac{P_{N}}{\Delta \vartheta_{m}} \cdot \tau_{\vartheta} = \frac{2}{191.5} \cdot 28,36 = 0,296 J K^{-1}$$
(48)

Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce. Hodnoty tepelné kapacity a koeficientu vyzařovaní tepla se u jednotlivých vzorků liší jen minimálně.

Tab. 5: Tabulka vypočtených koeficientů  $\pmb{\delta}$  a  $C_p,$  pro 3 vzorky rezistorů

Cp [JK <sup>-1</sup> ]	0,296	0,311	0,315
δ [WK-1]	0,0104	0,0106	0,0112

#### 3.4.2 Identifikace parametrů zjednodušené rovnice energetické bilance pomocí programu MATLAB

Další způsob, jak zjistit koeficienty z rovnice energetické bilance daného rezistoru, je použití programu MATLAB. Vytvořil jsem skript pro určení tepelné kapacity a koeficientu vyzařování. Tento skript nejdříve načte naměřená data ze zadaného souboru typu \*.dat, který vznikl při měření teploty rezistoru pyrometrem. Pro určení hledaných koeficientů se nabízí funkce *fminsearch*, která postupně mění parametry modelu tak, aby bylo hodnotící kritérium minimální. Před spuštěním této funkce je ještě nutné zadat počáteční vektor obsahující odhad počítaných koeficientů. Vhodná volba počátečního vektoru vede na rychlejší výpočet hledaných parametrů. Jako hodnotící kritérium jsem zvolil kvadratické kritérium zohledňující kvadrát rozdílu naměřených dat a výstupu modelu v daném kroku. Model rezistoru jsem vytvořil v nadstavbě SIMULINK. Aby bylo možné použít funkci *fminsearch*, bylo potřeba vytvořit ještě funkci, která bude vypočítávat hodnotící kritérium. Do této funkce lze ještě vložit podmínky, aby aproximované hodnoty měly fyzikální význam a nenabývaly například záporných hodnot.

Po ukončení výpočtu se vypíšou hodnoty tepelné kapacity a koeficientu vyzařování, které nejlépe aproximují naměřená data. Zobrazí se také graf naměřených hodnot a vypočteného průběhu teploty při trvalém zatížení (Obr. 14). Aproximace není úplně optimální, jak je vidět na Obr. 14, což je způsobeno zjednodušeným návrhem

modelu rovnice energetické bilance. Tento model rezistoru poměrně dobře popisuje průběh oteplení při trvalém zatížení. V provozu s mžikovým zatížením se však již nehodí.



Obr. 14: Graf zobrazující naměřená data a jejich aproximaci pomocí programu MATLAB

V Tab. 6 jsou uvedeny vypočtené hodnoty tepelné kapacity a koeficientu vyzařování, které byly vypočteny pomocí vytvořeného skriptu. Z tabulky lze vyčíst, že hodnoty tepelné kapacity a koeficientu vyzařování u jednotlivých pokusů nemají velkou odchylku od jejich průměru.

	1			2	3		
	Cp [JK <sup>-1</sup> ]	δ [WK <sup>-1</sup> ]	Cp [JK <sup>-1</sup> ]	δ [WK <sup>-1</sup> ]	Cp [JK <sup>-1</sup> ]	δ [WK <sup>-1</sup> ]	
Ι.	0,317	0,00982	0,343	0,0102	0,353	0,0108	
II.	0,326	0,0101	0,338	0,0101	0,347	0,0107	
III.	0,317	0,0102	0,355	0,00984	0,356	0,0108	
pruměr	0,320	0,0100	0,345	0,0101	0,352	0,0107	

Tab. 6: Tabulka vypočtených koeficientů pomocí skriptu, každý sloupec připadá k danému rezistoru, řádky odpovídají jednotlivým pokusům

#### 3.4.3 Identifikace parametrů navrženého modelu pomocí programu MATLAB

K identifikaci parametrů navrhnutého modelu jsem použil stejný skript jako v předchozí kapitole. Upravil jsem pouze, které parametry se budou hledat. Hledanými parametry jsou  $d_{21}$ ,  $d_{31}$  a  $d_a$ .

Hodnoty tepelných kapacit jsem vypočítal pomocí fyzikálních konstant. Tloušťku odporové vrstvy *s* jsem změřil na mikroskopu a její velikost je přibližně 2  $\mu$ m. C<sub>p1</sub> představuje tepelnou kapacitu odporové vrstvy. Délku rezistoru *l* a jeho poloměr *r* jsem vyčetl z katalogového listu [11]. Velikost objemové hustoty jsem zjistil z [13]. Hodnotu tepelné kapacity odporové vrstvy jsem zvolil z rozsahu uvedeném v Tab. 1.

$$V_1 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 2 \cdot 11 \cdot 10^{-12} = 2,76 \cdot 10^{-10} m^3$$
(49)

$$m_1 = V_1 \cdot \rho_m = 2,76 \cdot 10^{-10} \cdot 8000 = 2,21 \cdot 10^{-6} kg$$
<sup>(50)</sup>

$$C_{p1} = m_1 \cdot c = 2,21 \cdot 10^{-6} \cdot 500 = 1,11 \cdot 10^{-3} \, JK^{-1}$$
(51)

Hodnotě  $C_{p2}$  odpovídá tepelná kapacita keramického tělíska, které tvoří střed rezistoru. Použité konstanty jsem našel v literatuře uvedené v předchozím odstavci.

$$V_2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s_1 \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 0, 2 \cdot 11 \cdot 10^{-9} = 2,76 \cdot 10^{-8} m^3$$
(52)

$$m_2 = V_2 \cdot \rho_m = 2,76 \cdot 10^{-8} \cdot 1200 = 3,31 \cdot 10^{-5} \, kg \tag{53}$$

$$C_{p2} = m_2 \cdot c = 3,31 \cdot 10^{-5} \cdot 300 = 9,93 \cdot 10^{-3} JK^{-1}$$
(54)

Hodnotě  $C_{p3}$  odpovídá tepelná kapacita povrchu odporové vrstvy, která ji izoluje od okolního prostředí. Fyzikální konstanty materiálů jsem použil z literatury uvedené v předchozích odstavcích.

$$V_3 = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l = \pi \cdot 2^2 \cdot 11 \cdot 10^{-9} = 1,38 \cdot 10^{-7} m^3$$
(55)

$$m_3 = V_3 \cdot \rho_m = 1,38 \cdot 10^{-7} \cdot 3800 = 5,24 \cdot 10^{-4} \, kg \tag{56}$$

$$C_{p3} = m_3 \cdot c = 5,24 \cdot 10^{-4} \cdot 600 = 0,314 J K^{-1}$$
(57)

V Tab. 9 jsou uvedeny vypočtené koeficienty  $d_{21}$ ,  $d_{31}$  a  $d_a$ , které nejlépe odpovídaly naměřeným hodnotám. Z tabulky je vidět, že vypočtené koeficienty se od sebe liší jen nepatrně.

	vzorek no. 1			vzorek no. 2			vzorek no.3		
	d <sub>21</sub>	d <sub>31</sub>	da	d <sub>21</sub>	d <sub>31</sub>	d <sub>a</sub>	d <sub>21</sub>	d <sub>31</sub>	d <sub>a</sub>
Ι.	0,7633	0,2542	0,0079	0,7559	0,2534	0,0080	0,7569	0,2533	0,0093
П.	0,7636	0,2541	0,0081	0,7578	0,2538	0,0082	0,7584	0,2528	0,0092
III.	0,7621	0,2540	0,0081	0,7609	0,2540	0,0082	0,7564	0,2524	0,0092
průměr:	0,763	0,254	0,008	0,758	0,254	0,008	0,757	0,253	0,009

Tab. 7: Tabulka vypočtených koeficientů  $d_{21}$ ,  $d_{31}$  a  $d_a$  v [WK<sup>-1</sup>] pomocí skriptu, řádky odpovídají jednotlivým pokusům

#### 3.4.4 Porovnání výsledků identifikace parametrů modelu

Identifikace pomocí časových konstant umožňuje získat pouze koeficient vyzařování a tepelnou kapacitu rezistoru jako celku. Identifikace zjednodušené rovnice energetické bilance pomocí programu MATLAB jen ověřuje koeficienty zjištěné pomocí časových konstant. Hodnoty tepelné kapacity a koeficientu vyzařování se pro tyto dva postupy od sebe lišily přibližně do 10 %. Tepelná kapacita u identifikace pomocí funkce *fminsearch* byla vždy větší než hodnota vypočtená pomocí tepelné časové konstanty. Tento model jsem vyhodnotil z důvodu orientačního zjištění tepelné kapacity rezistoru jako celku a ověření vztahů uvedených v kapitole 2.3.

Pro simulaci oteplení při mžikovém zatížení se hodí pouze poslední model, který rozděluje rezistor na tři části. Tepelná kapacita ze zjednodušeného modelu je řádově shodná s vypočtenou tepelnou kapacitou keramického tělíska. Potvrzuje tak správný výběr fyzikálních konstant měrného tepla a objemové hustoty v rozsahu, který je uveden v tabulce. Tento postup volby velikosti konstant z tabulky jsem musel zvolit z důvodu neposkytnutí přesných typů materiálů, které jsem od výrobců rezistorů po dlouhém vyjednávání nakonec neobdržel. Koeficienty d<sub>21</sub>, d<sub>31</sub> a d<sub>a</sub>, které jsem tímto způsobem získal, mají malý rozptyl.

#### 3.5 Citlivostní analýza modelu

Rovnice energetické bilance se často zjednodušuje, protože některé členy rovnice (7) se na celkovém oteplení projevují více a některé méně. Citlivostní analýza

nám umožňuje zjistit, jak moc je maximální oteplení závislé na změně koeficientů v rovnici energetické bilance rezistoru. Citlivostní analýza také odhalí, jestli je možno některé členy z rovnice energetické bilance zanedbat při dimenzování rezistorů zatěžovaných krátkým impulsem.

Navržený model přesně neodpovídá rovnici energetické bilance, ale snaží se ji nahradit. Následující výpočet citlivosti se tak bude vztahovat k citlivosti parametrů navrhnutého modelu na jeho vstupní parametry. Citlivostní analýza by tak měla odhalit, jak jednotlivé parametry ovlivňují maximální dosaženou teplotu rezistoru.

#### 3.5.1 Relativní citlivostní funkce

Vychází z předpokladu, že relativní změna vstupního parametru funkce *dP/P* v systému odpovídá relativní změně výstupní funkce *dY/Y*. Relativní citlivost má tedy následující tvar (58). Relativní citlivostní fukce je obecně komplexní funkce.

$$S_P^Y = \frac{\frac{dY}{Y}}{\frac{dP}{P}}$$
(58)

Funkce Y je v tomto případě maximum dosažené teploty v odporové vrstvě. Funkce P je konstantní funkcí s velikostí 0,01, vyjadřuje změnu zkoumaného parametru o 1 %.

#### 3.5.2 Výpočet relativní citlivosti modelu

Pro výpočet této rovnice jsem použil program MATLAB a vytvořený model. Model umožňuje nastavení jednotlivých parametrů, které jsou zde jako vstupy. Výstupem modelu je průběh teploty a času. Časový výstup je zde důležitý hlavně proto, že SIMULINK nastavuje automaticky krok simulace. Tuto volbu automatického kroku jsem zvolil z důvodu rozdílných časů simulace, které se od sebe výrazně liší a to o několik řádů v závislosti na zadané délce zatěžujícího impulsu. Pro zjištění citlivostní analýzy jsem vytvořil program, který spolupracuje s modelem vytvořeným v prostředí SIMULINK.

První varianta umožňuje nastavení všech konstant použitých v modelu rezistoru. Proudový impuls s konstantní amplitudou, kterým je rezistor zatěžován, má obdélníkový průběh s nastavenou amplitudou 0,4 A. Citlivost se určuje ze změny maximální dosažené teploty v odporové vrstvě z modelu před a po změně koeficientu o 1 %. Po ukončení výpočtu se vypíše tabulka (Tab. 8), která obsahuje citlivost změny maximální teploty na jednotlivé koeficienty při různě dlouhých zatěžovacích impulsech. Vypočtené hodnoty jsou graficky zobrazeny na Obr. 15.

citlivost na parametr							
délka impulsu [s]	C <sub>p1</sub>	C <sub>p2</sub>	C <sub>p3</sub>	d <sub>21</sub>	d <sub>31</sub>	da	
0,0001	0,061	0,000	0,0	0,002	0,00	0,00	
0,0002	0,105	0,000	4,8	0,008	4,83	4,83	
0,0004	0,161	0,000	9,6	0,025	9,62	9,64	
0,0008	0,198	0,002	11,7	0,067	11,68	11,72	
0,0016	0,175	0,008	9,8	0,145	9,70	9,79	
0,0032	0,097	0,029	7,9	0,223	7,81	7,93	
0,0064	0,050	0,081	10,8	0,223	10,62	10,78	
0,0128	0,049	0,159	15,4	0,155	15,23	15,45	
0,0256	0,028	0,234	18,3	0,086	17,95	18,26	
0,0512	0,020	0,257	16,9	0,021	16,50	16,92	
0,1024	0,064	0,190	11,9	0,072	11,45	11,98	
0,2048	0,034	0,081	10,9	0,023	10,47	11,01	
0,4096	0,019	0,041	16,5	0,007	16,37	16,72	
0,8192	0,024	0,023	24,7	0,027	24,75	25,01	

Tab. 8: Tabulka vypočtených citlivostí na jednotlivé parametry modelu, při konstantní amplitudě zatěžovacího impulsu



Obr. 15: Graf závislosti citlivosti jednotlivých parametrů modelu na délce zatěžovacího impulsu při konstantní amplitudě I = 0,4 A

Druhá varianta citlivostní analýzy se od té první odlišuje tím, že nezachovává konstantní amplitudu při různých délkách zatěžovacích impulsů, ale mění amplitudu pulsu tak, aby byla zachována konstantní energie dodaná do rezistoru. Dodaná energie je tak parametrem, jehož velikost jsem nastavil na 2 J. Výsledky této varianty citlivostní analýzy jsou uvedeny v Tab. 9 a jsou zobrazeny na Obr. 16.

citlivost na parametr							
délka pulsu [s]	C <sub>p1</sub>	C <sub>p2</sub>	C <sub>p3</sub>	d <sub>21</sub>	d <sub>31</sub>	d <sub>a</sub>	
0,0001	0,944	0,000	0,00	0,033	0,01	0,00	
0,0002	0,901	0,000	4,40	0,065	4,43	4,40	
0,0004	0,818	0,001	12,9	0,125	13,0	12,9	
0,0008	0,673	0,005	28,1	0,227	28,3	28,1	
0,0016	0,451	0,020	49,3	0,373	49,6	49,3	
0,0032	0,214	0,064	61,6	0,485	62,0	61,6	
0,0064	0,101	0,157	54,5	0,430	54,9	54,5	
0,0128	0,078	0,269	43,6	0,263	44,2	43,6	
0,0256	0,060	0,339	39,2	0,109	39,8	39,2	
0,0512	0,004	0,313	42,1	0,009	42,9	42,1	
0,1024	0,095	0,197	46,7	0,022	47,4	46,6	
0,2048	0,010	0,067	39,8	0,026	40,2	39,6	
0,4096	0,039	0,036	26,2	0,014	26,2	26,0	
0,8192	0,028	0,013	15,5	0,093	15,4	15,3	

Tab. 9: Tabulka citlivostí jednotlivých parametrů modelu na délce zatěžovacího impulsu při konstantní energii = 2 J



Obr. 16: Graf závislosti citlivosti jednotlivých parametrů modelu na délce zatěžovacího impulsu při konstantní energii = 2 J

#### 3.5.3 Zhodnocení citlivosti modelu na jednotlivé koeficienty

Z citlivostní funkce s konstantní amplitudou je vidět, že pro impulsy 2J a délce trvání 0,8 ms je citlivost  $C_{p1}$  (tepelná kapacita odporové vrstvy) nejvyšší. To znamená, že tepelná kapacita odporové vrstvy se nejvíce uplatňuje do velikosti impulsů 0,8 ms. Při kratších impulsech se nestačí plně využít schopnost akumulovat vzniklou tepelnou energii. Citlivost na parametr  $C_{p2}$  (tepelná kapacita izolační vrstvy) je nejvyšší pro impuls dlouhý pro 51,2 ms, při této velikosti impulsu má tepelná kapacita izolační vrstvy nejvyšší citlivost. Nejvyšší citlivost má však tepelná kapacita keramického tělíska  $C_{p3}$ , která je 100krát větší, ale uplatňuje se až při delších impulsech. Koeficient přestupu tepla  $d_{21}$  má vysokou citlivost v době, kdy mají zároveň tepelná kapacita odporové i izolační vrstvy vyšší citlivost. Parametry  $d_{31}$  a  $d_a$  mají řádově vyšší citlivost než  $d_{21}$  a jejich průběh kopíruje citlivost na parametr  $C_{p3}$ .

Citlivosti koeficientu  $C_{p1}$  u varianty modelu s konstantní energií pulsu klesá s délkou zatěžovacího pulsu. Je tedy vidět, že tepelná kapacita odporové vrstvy se nejvíce uplatňuje při krátkých zatěžovacích impulsech, při delších impulsech se už stačí část tepelné energie převést do ostatních vrstev. Citlivost na parametr  $C_{p2}$  je nejvyšší pro impuls dlouhý pro 25,6 ms. Nejvyšší citlivost z tepelných kapacit má opět tepelná kapacita keramického tělíska. Parametry d<sub>31</sub> a d<sub>a</sub> mají také řádově vyšší citlivost než d<sub>21</sub> a jejich průběh kopíruje citlivost na parametr  $C_{p3}$ .

#### 3.6 Simulace průběhu teploty

Pro simulaci oteplení jednotlivých vrstev rezistoru pomocí vytvořeného modelu jsem použil skript, který spustí simulaci s postupně vzrůstající délkou zatěžovacího pulsu. Parametry modelu jsem nastavil na hodnoty, které jsem určil pomocí identifikace. Velikost zatěžovacího proudu jsem zvolil 1 A. Oteplení rezistoru jsem zkoumal v oblasti od 1 ms do 2 s krok výpočtu jsem zvolil logaritmický o základu dva.

Tato oblast je zajímavá především pro účely použití rezistorů do stupňových spouštěčů malých transformátorů. Například stupňový spouštěč pro transformátor se zdánlivým výkonem 40 VA zařazoval rezistor mezi napájecí síť a transformátor na dobu jedné periody napájecího napětí tedy na 20 ms. Tato doba plně postačovala k omezení zapínacího proudu transformátoru, který by jinak vybavil jistič.



Obr. 17: Maximální teplota jednotlivých částí rezistoru v závislosti na délce zatěžovacího pulsu, vlevo P = 196 W, vpravo P = 400 W

Jak je vidět z Obr. 17 teplota izolační vrstvy při krátkých zatěžovacích pulsech zaostává za teplotou odporové vrstvy až přibližně do délky pulsu 50 ms, kdy už dochází k téměř identickému maximálnímu oteplení. Keramické tělísko se ani při pulsech v řádu jednotek sekund neprohřeje na teplotu blízké teplotě odporové vrstvy, to odpovídá hodnotám tepelné kapacity keramického tělíska, která je řádově větší než tepelné kapacity zbylých částí. Simulovaný průběh při teplotě nad 1200 °C u odporové vrstvy není reálný, protože by při této teplotě došlo již k trvalému poškození rezistoru.

délka pulsu	teplota [°C]						
[s]	odporové vrstvy	izolační vrstvy	keramického tělíska				
0,001	137	33	21				
0,002	187	46	21				
0,004	229	71	22				
0,008	271	120	25				
0,016	342	208	30				
0,032	456	353	39				
0,064	607	544	58				
0,128	749	718	95				
0,256	849	827	168				
0,512	975	947	310				
1,024	1196	1150	579				
2,048	1537	1447	1041				

Tab. 10: Tabulka maximálních dosažených teplot v různých částech rezistoru v závislosti na délce pulsu, P = 196 W

Na Obr. 18 je znázorněn typický průběh teploty v čase při zatížení proudem 1,4 A a délce pulsu 16 ms. Z grafu je vidět, že při krátkodobém zatížení zkoumaného rezistoru s odporem 100  $\Omega$  a maximálním dovoleným trvalým zatížení 2 W, by nemělo dojít k jeho destrukci. Teplota odporové vrstvy dosáhla hodnoty do 450 °C, teplota

izolační vrstvy mírně přesáhla teplotu 350 °C a keramické tělísko se téměř nestačilo ohřát z původní teploty na teplotu 50 °C. Teplota odporové vrstvy nepřesáhla maximální dovolené oteplení dané teplotou tání odporové vrstvy.



Obr. 18: Typický průběh teploty při zatížení 192 W a délce pulsu 16 ms

Logaritmické měřítko časové osy jsem zvolil z důvodu zviditelnění průběhu teploty. Časový krok simulace je nastaven na automatický krok z důvodu rozdílných časových intervalů při určení maximálního oteplení.

#### 4. Měření rezistoru při mžikové zatížení

#### 4.1 Měřicí aparatura

Pro měření při mžikovém zatížení jsem zvolil jako zdroj elektrické energie pro rezistor laboratorní programovatelný zdroj Kikusui PCR 2000LA. Tento zdroj je složen z rychlého lineárního zesilovače a syntetizátoru libovolného signálu, který si uživatel naprogramuje. Tuto variantu zdroje zatěžovacího impulsu pro rezistor jsem zvolil z důvodu dostupnosti tohoto zdroje ve školní laboratoři. Nemusel jsem tak konstruovat žádný speciální obvod, který by dokázal na výstupu poskytnout impuls s požadovanou délkou v řádu milisekund až sekund a s regulací výstupního napětí.



#### Obr. 19: Schéma měřicí aparatury

Zdroj Kikusui PCR 2000LA může pracovat v režimu AC i DC, má dva napěťové rozsahy označené jako 100 V a 200 V. Tento model umožňuje na výstupu poskytnout výkon až 2 kVA. Zdroj Kikusui PCR 2000LA má také vestavěné měřicí obvody pro měření napětí a proudu. Tento zdroj může komunikovat s počítačem pomocí linky RS 232 nebo rozhraní GPIB. Toto zařízení tak splňuje všechny požadavky na zdroj zatěžovacích impulsů pro měření rezistorů. Zdroj, který je umístěn ve školní laboratoři, je k počítači připojen rozhraním GPIB, které je však realizováno pomocí převodníku na USB linku. Zdroj je ovládán prostřednictvím programu MATLAB.

Proud, který odporem protéká, se měří proudovou sondou HAMEG HZ 56-2. Napětí je měřeno diferenciální sondou TESTEC TT-SI 9002 a je nastavena v režimu 1:200. Výstupy proudové i napěťové sondy jsou přivedeny do multifunkčního AD převodníku Nationals Instrument USB 6211 na analogové vstupy. AD převodník je 16bitový a navzorkuje 250 tisíc vzorků za sekundu. Tento převodník je připojen k PC pomocí USB.

Měřicí aparatura déle zahrnuje pyrometr, kterým se měří povrchová teplota rezistoru.

#### 4.2 Vlastní měření

Rezistor byl zatěžován impulsy o délce 50, 75 a 100 ms, které se 150krát opakovaly. Mezi impulsy byla pauza po dobu pěti minut z důvodu jeho ochlazení na okolní teplotu. Tato doba plně postačuje k ochlazení rezistoru, jak je vidět i z měření při trvalém zatížení na Obr. 13. Po dokončení tohoto cyklu se zvýší délka pulsu a rezistor je opět třicetkrát zatěžován. Cyklus měření se opakuje do doby, než je rezistor zničen. Destrukce rezistoru je detekována velikostí proudu, který rezistorem prochází. Při poklesu proudu na 10 % z původní hodnoty je vzorek odpojen a měření je ukončeno.



Obr. 20: Zatěžovací impulsy

K měření impulsního zatížení jsem použil program Matlab, který ovládal měřicí přístroje a laboratorní zdroj. Pro měření bylo potřeba vytvořit M-file, který ovládal tyto zařízení, a měření tak bylo plně automatické. Zdroj se musí nejdříve nastavit do požadovaného režimu. Dále je nutné vytvořit základní sekvenci, která se uloží do jeho paměťové banky. V průběhu měření se již bude měnit jen délka impulsu. Ve smyčce se poté volá z banky vytvořená sekvence a na výstupu zdroje se nastaví požadované napětí, počet průchodu smyčkou je určen počtem opakování měření a velikostí vektoru, jehož složky jsou délky zatěžovacích impulsů. Průběh napětí a proudu je v každém průchodu smyčkou zaznamenán a uložen do souboru typu \*.mat. Dále je ještě v souboru zaznamenán datum měření, vzorkovací frekvence, velikost napětí zdroje a délka impulsu. Naměřená data lze pak z těchto uložených souborů kdykoliv vyhodnotit a jednoduše archivovat.

## 5. Vyhodnocení měření a porovnání výsledků s modelem

#### 5.1 Měření při zatížení 192 W

Na Obr. 21 je zobrazen průběh napětí a proudu při nedestruktivním zatěžovacím pulsu trvající 50 ms. Z grafu je vidět, že odpor s dobou zatížení roste a naměřený proud protékající rezistorem proto klesá. Vzhledem ke krátké době provozu se rezistor nepoškodí ani při opakovaném zatížení. Na grafu je zobrazen průběh napětí a proudu při zatížení 192 W, délce pulsu 50 ms a 107. opakování.



Obr. 21: Průběh napětí a proudu při nedestruktivním pulsu, P= 192 W, t<sub>on</sub> = 50 ms Při délce zatěžovací impulsu 50 ms dosáhla teplota povrchu rezistoru 170 °C. Růst teploty trval přibližně 100 ms (Obr. 22). Teplota okolí zůstala konstantní.



Obr. 22: Naměřený průběh teploty povrchu rezistoru při délce impulsu 50 ms



Obr. 23: Průběh napětí a proudu při destruktivním pulsu, P = 192 W,  $t_{on}$  = 100 ms

Na Obr. 23 je vidět průběh proudu a napětí při destruktivním zatěžovacím pulsu trvajícím 101 ms. K destrukci rezistoru došlo při 8. opakování zatěžovacího pulsu.

Z grafu na Obr. 24 je vidět, že již předchozí pulsy stejné velikosti měřený vzorek poškodily, důsledkem toho je nejdříve pokles naměřeného proudu zapříčiněný zvýšením odporu se zvyšující se teplotou. Tento pokles je však vystřídán vzrůstem proudu, který je způsoben snížením odporu. Do odporové vrstvy se při výrobě frézují drážky, které upravují velikost odporu do požadované hodnoty. Tyto drážky se pravděpodobně zanášejí odpařeným materiálnem z odporové vrstvy při vysoké teplotě. V jiném místě se může odporová dráha zeslabit tak, že dojde k jejímu přerušení a tím i k destrukci rezistoru. Při přerušení odporové dráhy vzniká elektrický oblouk.



Obr. 24: Detailní průběh napětí a proudu při pulsu, který rezistor již poškozuje, t<sub>on</sub> = 100 ms



Obr. 25: Graf velikosti maxima odporu v závislosti na délce zatěžovacího pulsu, P= 192 W

Na Obr. 25 je znázorněna velikost maxima odporu v jednotlivých pokusech. Z grafu je vidět, že při 100 ms pulsu se maximální odpor značně mění. Při kratších pulsech nedochází k tak velkým změnám odporu.

Z měření vyplývá, že i při opakovaném zatížením 2W rezistoru krátkodobým výkonem 192 W nedojde k jeho poškození. Rezistor tak může mít 100krát menší dovolený výkon než při trvalém zatížení.

Na Obr. 27 je fotografie použitého rezistoru, který byl zatěžován pulsy podle výše uvedeného postupu. Na fotografii je vidět místo, kde došlo k poškození odporové vrstvy. Rezistor se vždy poškodil poblíž středu rezistoru, destrukce byla doprovázena vznikem elektrického oblouku v místě poškození. Místo poškození odpovídá průběhu teploty na Obr. 2, kde je znázorněn průběh teploty vzhledem ke zkoumanému místu.



Obr. 26: Fotografie měřeného rezistoru s vyznačením místa poškozením

#### 5.2 Měření při zatížení 400 W

Měření se provádělo za stejných podmínek jako předchozí měření s rozdílem velikosti výstupního napětí zdroje, které bylo nastaveno na 200 V. Doby zatěžovacích

impulsů, které by tento typ rezistoru mohl vydržet, jsou nižší než u předchozího měření. Limitující podmínka měření je minimální délka impulsu, který lze na použitém zdroji vygenerovat. Proto jsem zvolil délku zatěžovacího pulsu od 10 ms. Pulsy se měly také 150krát opakovat.

Z Obr. 28 je vidět, že již první puls o délce 10 ms tento rezistor poškozuje, protože odpor roste s časem. Zvlnění na začátku impulsu je chybou použité proudové sondy, která nemá dostatečně velkou rychlost přeběhu. Při sedmém opakování došlo k destrukci rezistoru. Průběh proudu odpovídá vzniklému elektrickému oblouku, který v rezistoru vznikl. Zkoumaný rezistor nelze zatěžovat pulsy o výkonu 400 W a délkou 10 ms a vyšší.



Obr. 27: Průběh napětí a proudu při pulsu  $t_{on} = 10$  ms, vlevo detail 1. opakování, vpravo 7. opakování

#### 5.3 Porovnání výsledků modelu a měření

Při měření rezistoru, který byl opakovaně zatížen 192 W po dobu 100 ms, došlo k jeho zničení. Z Tab. 10 lze vyčíst, že navržený model rezistoru při stejném zatížení vykazuje teplotu odporové vrstvy blízko 700 °C. Při druhém měření se rezistor zatěžoval pulsy o výkonu 400 W a délce trvání 10 ms. Při těchto impulsech došlo ke zničení rezistoru. Z Obr. 17 lze vyčíst, že při délce pulsu 10 ms má model rezistoru teplotu vrstvy také teplolu v okolí 700 °C. Při měření oteplení povrchu rezistoru pyrometrem se naměřená teplota neshodovala s teplotou izolační vrstvy vypočtenou z počítačového modelu, naměřená teplota byla nižší.

#### 6. Závěr

Navrhl jsem jednoduchý počítačový model rezistoru s koncentrovanými parametry, který simuluje průběh oteplení rezistoru vzhledem k velikosti příkonu. Tento model je prvním přiblížením k modelu popisující chování rezistoru. K návrhu modelu jsem použil induktivní přístup. Narhl jsem měřící aparaturu a změřil jsem vzorky rezistorů až do destrukce.

Z naměřených hodnot vyplývá, že 2W rezistor můžeme při délce impulsu 50 až 75 ms poddimenzovat až 100krát. Rezistor se vždy poškodil poblíž středu rezistoru, destrukce byla doprovázena vznikem elektrického oblouku v místě poškození. Při zpracování naměřených dat bylo neobvyklé, že odpor rezistoru při impulsech, které rezistor již poškozují, měl nejdříve stoupající tendenci a po uplynutí části impulsu začal klesat. Růst odporu je dán zvyšující se teplotou odporové vrstvy. Pokles odporu má spojitost s ději uvnitř rezistoru, které ho poškozují. Při opakovaných impulsech, u kterých se projevuje nejdříve růst a poté pokles odporu, dochází k jeho destrukci. Z porovnání výsledků modelu rezistoru a měření vyplývá, že u zkoumaného rezistoru dochází k jeho destrukci při dosažení teploty odporové vrstvy 700 °C. Použitý model ovšem předpokládá homogenní rozložení teploty uvnitř odporové vrstvy, což zjevně není díky frézováným drážkám zaručeno. Teplota tání odporového materiálu by se však měla pohybovat nad 1000 °C. Teplota tání odporové vrstvy a její dosažení však nemusí být jediný faktor určující životnost rezistoru. Lze předpokládat i další destrukční mechanismy např. zvýšením míry vzájemné difuse materiálů při vysokých teplotách.

Pro ověření, zda opravdu dochází k destrukci rezistoru při daných rozměrech impulsů v modelu rezistoru při překročení teploty odporové vrstvy 700 °C, by bylo nutné provést další měření. Tato měření by měla zohledňovat v praxi požadovanou minimální životnost rezistoru, který by měl vydržet alespoň 10 tisíc impulsů. Měření by bylo vhodné provádět i pro více hodnot výkonu impulsu. Doba měření by se pak pohybovala v řádu měsíců. Pro přesnější údaje o možném poddimenzování rezistoru by bylo nutné vytvořit lepší a složitější počítačový model s rozloženými parametry. Tento model by více odpovídal reálnému rezistoru a jeho chování. Po ověření správnosti modelu by pak bylo možné jednoduše určit velikost jmenovitého výkonu rezistoru pro dané použití.

#### Seznam použité literatury

- [1] Dsh.114-133.1.pdf [online]. 2004 [cit. 2011-05-02]. Metal oxide film resistors. Dostupné z WWW: <a href="http://www.gme.cz/\_dokumentace/dokumenty/114/114-133/dsh.114-133.1.pdf">http://www.gme.cz/\_dokumentace/dokumenty/114/114-133/dsh.114-133.1.pdf</a>>.
- [2] Rezistory-brzdne-sestavy-IP54-IP20-resistors-braking-assemblies [online]. 2004 [cit. 2011-03-11]. Drátové výkonové rezistory v Al pouzdře. Dostupné z WWW: <http://www.tesla-blatna.cz/\_soubory/rezistory-brzdne-sestavy-IP54-IP20resistors-braking-assemblies.pdf>.
- [3] HÖFT, Herbert. *Pasívní součástky pro elektroniku*. SNTL Nakladatelství technické literatury, Praha 1983.
- [4] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje, II. Elektrické přístroje*. SNTL Nakladatelství technické literatury, Praha 1982.
- [5] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*. SNTL, Praha 1953.
- [6] NEWPORT ELECTRONICS, s.r.o. *Tabulka emisivit kovových materiálů* [online], 2005. [cit. 1. listopadu 2010] Dostupné z WWW:
   <a href="http://www.newport.cz/techinfo/emiskovy.html">http://www.newport.cz/techinfo/emiskovy.html</a>>.
- [7] NEWPORT ELECTRONICS, s.r.o. *Tabulka emisivit nekovových materiálů* [online], 2005. [cit. 1. listopadu 2010] Dostupné z WWW:
   <a href="http://www.newport.cz/techinfo/emisnekovy.html">http://www.newport.cz/techinfo/emisnekovy.html</a>>.
- [8] THE ENGINEERING TOOLBOX. Thermal Conductivity of some common Materials [online], [cit. 1. listopadu 2010] Dostupné z WWW:
   <a href="http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\_429.html">http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\_429.html</a>
- [9] BARBALACE, Kenneth. *Table of Elements Sorted by Thermal Conductivity*.
   EnvironmentalChemistry.com, 1995 2010, [online]. [cit. 1. listopadu 2010]
   <a href="http://EnvironmentalChemistry.com/yogi/periodic/thermal.html">http://EnvironmentalChemistry.com/yogi/periodic/thermal.html</a>
- [10] GIM3590\_e.pdf [online]. 2006 [cit. 2011-03-08]. GIM 3590 LaserSight.
   Dostupné z WWW:
   <a href="http://www.greisinger.de/files/upload/en/produkte/bda/GIM3590\_e.pdf">http://www.greisinger.de/files/upload/en/produkte/bda/GIM3590\_e.pdf</a>>.
- [11] Dsh.114-577.1.pdf [online]. 21.2.2008 [cit. 2011-02-09]. Power Metal Film Resistors. Dostupné z WWW:
   <a href="http://www.gme.cz/\_dokumentace/dokumenty/114/114-577/dsh.114-577.1.pdf">http://www.gme.cz/\_dokumentace/dokumenty/114/114-577/dsh.114-577.1.pdf</a>>.

- [12] ÅSTRÖM, K., J., & HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Tudory, Design, and Tuning, 2nd edition*, (343 s.), Instrument Society of America, 1995.
- [13] ČMELÍK, M., MACHONSKÝ, L., ŠÍMA, Z. Fyzikální tabulky. TUL, Liberec 2005, ISBN 80-7372-009-4.

## Přílohy

#### A Struktura dokumentů na přiloženém CD

- fotografie\_pracoviste Tato složka obsahuje fotografie pracoviště, kde probíhalo měření. Na fotografiích jsou vidět použité měřicí přístroje.
- model V této složce jsou uloženy skripty vytvořené v programu Matlab pro identifikaci naměřených dat, simulaci a citlivostní analýzu. Je zde uložen i navrhnutý počítačový model rezistoru.
- namerena\_data\_Kikusui Zde jsou uložena naměřená data průběhů napětí a proudu z impulsního zatěžování pomocí navrhnuté měříci soustavy obsahující zdroj Kikusui PCR 2000LA.
- namerena\_data\_teplota V této složce jsou uloženy naměřené hodnoty z pyrometru GIM 3590.
- ovladani\_zdroje\_Kikusui Tato složka obsahuje skript pro ovládání zdroje Kikusui PCR 2000LA a získávání dat z proudové a diferenciální sondy pomocí programu Matlab.
- pouzite\_datasheety
- pyrometr\_GIM3590 Zde jsou uloženy informace o použitém pyrometru.
- uvedene\_obrazky