

Měření teplot při impulsním zatěžování

TEXT: Ing. Gunnar Künzel, Ing. Miloslav Linda, Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze

V praxi se často setkáváme s požadavkem správně a přesně měřit rychlé časové změny teplot. Příspěvek ukazuje dosavadní výsledky grantového projektu, jehož cílem je návrh laboratorního pracoviště pro testování statických a dynamických parametrů různých typů termočlánků (včetně mikrotermočlánků s velmi malou časovou konstantou) a stanovení přesnosti měření. Byl vytvořen generátor výkonových impulsů s nastavitelným příkonem a dobou trvání impulsů. Byla provedena identifikace statické a dynamické charakteristiky měřicího řetězce. Pomocí vybraných termočlánků byla realizována měření na tepelně zatěžovaném rezistoru TR 161.

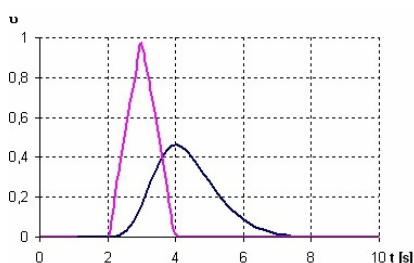
Termočlánky jsou dnes velmi rozšířené snímače teploty. Jsou univerzální, jejich nelinearitu lze kompenzovat a podle typu je lze použít od teplot -180°C až k 1800°C . Omezení teplotního užití termočlánků je dáno pouze průřezem použitých materiálů. Výrobci dodávají i různé tvary měřících konců. Např. nalepovací termočlánky jsou dodávány jako komplet vlastního termočlánku a nalepovací podložky, která tvoří ochrannou část sondy a slouží jako teplovodný tmel. Nevýhodou při použití termočlánků je jejich malé termoelektrické napětí, které se bez použití zesilovače nedá klasickými způsoby s dostatečnou přesností měřit. Analýza impulsní změny teploty elektrického objektu je použita s ohledem na jeho možné zatížení v elektrotechnice. Informace o časovém průběhu teploty, např. na rezistoru nebo polovodičovém prvku napájecího zdroje nebo spínacího zařízení dává při dlouhodobém sledování údaje, vhodné ke stanovení maximální teploty objektu, k jejich dimenzování nebo diagnostice.

Materiál a metody

Cílem grantového projektu je vytvoření laboratorního pracoviště pro experimentální určování statických a dynamických parametrů termočlánků a měření impulsních průběhů teplot na vybraných objektech v elektrotechnice.

V práci [3] byla provedena analýza chování různých senzorů teploty. Byl simulován průchod ideálního vstupního trojúhelníkového impulsu přenosovou soustavou senzoru teploty, vstupní a výstupní signály byly normovány. Obrázek 1 ukazuje případ dynamického zkreslení, kdy byl použit nevhodný snímač s přenosem $F_s(s)$. Tento snímač zachytí sotva polovinu hodnoty maximální teploty a reaguje se značným zpožděním na vstupní signál. Důsledek použití takového snímače – budou-li na měřeném objektu probíhat rychlé impulsní změny teploty, snímač nemá šanci je zaznamenat.

$$F_s(s) = \frac{1}{(0,5s^2 + s + 1)} \quad (1)$$

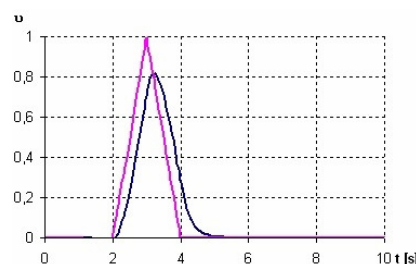


Obr. 1 Simulovaná odezva na vstupní impuls s dobou trvání 2s

Na obrázku 2 je simulována odezva snímače s vhodnějšími dynamickými vlastnostmi, ale stále ještě snímač

věrně nepřenesou celý vstupní impuls. To by časová konstanta senzoru musela být ještě menší. Kromě časové konstanty je důležitý též koeficient tlumení přenosového kanálu snímače. Pro dokonalejší přenos vstupního impulsu by bylo třeba snímač korigovat například pomocí operačního zesilovače s příslušným filtrem [2]. Obr. 3 ukazuje obdobný případ jako obr. 1, jako vstupní signál je však použit sinusový průběh teploty. Z něho je patrné pomalé dosažení střední hodnoty měřeného průběhu. Tento senzor vůbec nedokáže věrně reprodukovat vstupní sinusový signál. Je tedy vhodné volit časovou konstantu podle experimentu nejméně jako desetinu doby pulsu teploty nebo desetinu rychlosti změny vstupního signálu [1].

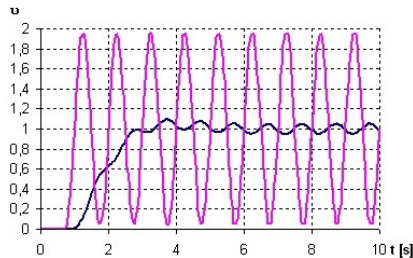
$$F_s(s) = \frac{1}{(0,01s^2 + 0,3s + 1)} \quad (2)$$



Obr. 2 Simulovaná odezva na vstupní impuls s dobou trvání 2s



$$F_s(s) = \frac{1}{(0,5s^2 + s + 1)} \quad (3)$$



Obr. 3 Simulovaná odezva na sinusový vstupní signál ($A = 1$, $f = 1\text{ Hz}$)

Z této analýzy lze stanovit zásady pro výběr vhodného typu termočlánku s ohledem na rychlost měřených impulsů teploty a požadované chyby měření. Dokonalá znalost měřeného objektu, průběhu teploty, informace o možných špičkách, bezpečnost, ekonomická stránka.

Tato část je důležitá pro optimální návrh celého měřicího systému. Musíme též zakomponovat bezpečnostní prvky, to znamená předvídat, do jaké míry se může měřený průběh měnit v čase (stárnutí systému). Důležitými parametry je také materiál, tvar a jakost povrchů, na kterých má být teplota měřena.

Výběr vhodného měřicího prvku

V laboratoři často používáme nepouzdržené termočlánky, které mají nejmenší časovou konstantu. V případě, že to prostředí měření vyžaduje, volíme vhodnou ochranu měřicího členu (jímkou, ochranný obal). Ta však zvětšuje časovou konstantu snímače. Podle velikosti teplotního rozsahu volíme vhodný snímač s ohledem na jeho

linearitu, která ovlivňuje kvalitu dalšího zpracování. V případě měření ve vysokoteplotních pecích musí průřez přírodních vodičů a jejich izolace odolávat této teplotě. Hlavním faktorem ovlivňujícím volbu termočlánkové sondy jsou rychlosti změny teplot na měřeném objektu a velikost časové konstanty snímače teploty. Ta přímo koresponduje s hmotností a velikostí snímače. Snímač se musí nejprve prohřát, a tudíž odebírá teplo měřenému objektu, takže dojde ke zkreslení výsledků. Termočlánky mají různé teplotní rozsahy a obecně nelineární statické charakteristiky. Lze je použít v různých provedeních (nepouzdržené, izolované, nalepovací a různých rozměrových proporcí). Přesnost termočlánkové sondy je dána činitelem kvality, který je vyjádřen jako poměr naměřené velikosti výstupního napětí k teoretické vstupní měřené velikosti teploty v použitelném rozsahu teplot. Činitel kvality bývá v intervalu 0,98 až 0,995.

Obvody pro zpracování signálu

Malé termoelektrické napětí (podle rozsahu teplot) zesílíme kvalitním stejnosměrným operačním zesilovačem a případně frekvenčně korigujeme pomocí aktivního filtru. Lze též použít měřicí ústřednu.

Záznamové zařízení

Jako nejvhodnější zařízení se používají měřicí karty do počítačů, dataloggery, měřicí ústředny, zapisovače a v laboratorních podmínkách paměťové osciloskopy. U těchto zařízení je důležité zvolit jejich vzorkovací frekvenci, aby byly zachyceny všechny změny měřené teploty.

Výsledky a diskuse

Realizované laboratorní pracoviště (Obr. 4) pro měření impulsních průběhů teplot na vybraných objektech zatěžovaných výkonem tvoří: impulsní zdroj proudu, který generuje definované impulsní změny tepelného výkonu; zatěžovaný objekt (v našem případě byl zvolen rezistor, který je pro své vlastnosti vhodným elektrickým prvkem); měřící zařízení - termočlánková sonda, zesilovač termoelektrického napětí a záznamové zařízení

Vstupní signál impulsně zatěžovaného objektu je vytvářen zdrojem impulsů o stanoveném výkonu, u kterého budeme měnit zatěžovatele z (lze uvádět též v %).

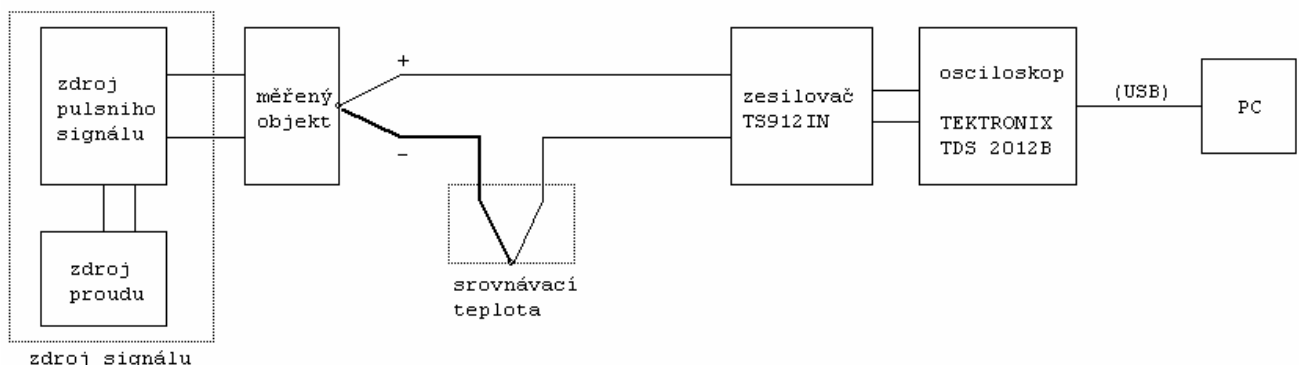
$$z = \frac{t_1}{T} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (4)$$

Ten je vyjádřen jako poměr doby trvání impulsu t_1 k periodě $T = t_1 + t_2$, kde t_2 je doba prodlevy mezi impulsy. Dodávaný střední výkon periodických impulsů do zatěžovaného objektu je

$$\bar{P} = \frac{P_1 t_1}{T} = P_1 z \quad (5)$$

kde P_1 je konstantní dodávaný výkon (příkon) v čase $0 < t < t_1$.

Zdroj signálu je procesorový, kde je na výstupním portu spínaný výkonový tranzistor IRF 3710 MOSFET ($V_{DSS} = 100\text{ V}$, $R_{DS(ON)} = 23\text{ m}\Omega$, $I_D = 57\text{ A}$, který dokáže spínat i impulsy menší než $1\text{ }\mu\text{s}$). Jím ovládáme zatěžovací proud z externího proudového zdroje (Manson SDP2405 0 - 5A).

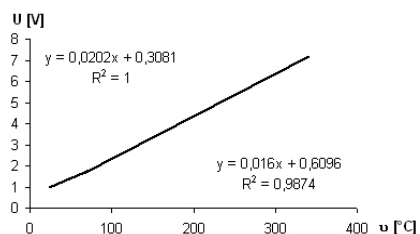


Obr. 4 Blokové schéma pracoviště

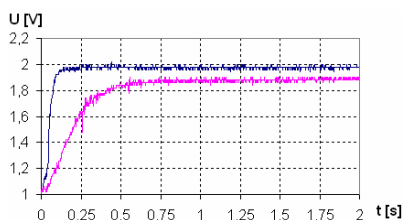
Pro zdroj pulsů je použit mikroprocesor typu PIC 18F242 – I/SP, jehož taktovací frekvence je 40 MHz (s krystalem 10MHz v režimu HS). Celý systém je napájen ze zdroje stabilizovaného napětí (7,5 V, max. 1 A). Vlastní procesor je napájen ze stabilizátoru napětí 7805, který má na výstupu stabilizované napětí 5 V. Proti rozkmitání napájecího napětí, které by vedlo k nestabilitě celého systému, je těsně u napájecích vstupů procesoru umístěn kondenzátor o kapacitě 100 nF. Schéma generátoru impulsů je na obrázku 5. Zesilovač (TS 912IN) je zapojen v neinvertujícím uspořádání. Hodnoty odporů jsou voleny v závislosti na požadovaném zesilení a linearitě. Jako dělicí rezistory jsou použity prvky s vysokou přesností 0,1 % typu MFR (Metal Film Resistors). Napájecí napětí zesilovače o velikosti 10 V je dodáváno ze stabilizátoru napětí.

Na vytvořeném generátoru výkonových impulsů lze tedy nastavit hodnoty t_1 , t_2 a příkon P_1 . Měření probíhalo na klidném vzduchu v laboratorním prostředí s teplotou okolů 24°C a byl použit termočlánek typu K s průměrem drátu 0,25 mm, typ 5TC-TT-K-30-36. Statická charakteristika snímače včetně vyhodnocovacího obvodu je na obrázku 6. Časová konstanta snímače včetně vyhodnocovacího obvodu je 0,1 s (mě-

řeno v kapalině) a 0,3 s (měřeno na vzduchu), jak vyplývá z obr. 7. V rozsahu 0°C až 60°C je použita regresní rovnice $U = 0,016 \cdot u + 0,6096$ a v intervalu od 60°C do 340°C je $U = 0,0202 \cdot u + 0,3081$.

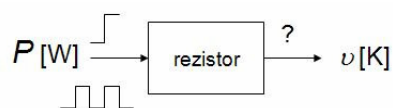


Obr. 6 Statická charakteristika měřícího řetězce



Obr. 7 Dynamická charakteristika měřícího řetězce

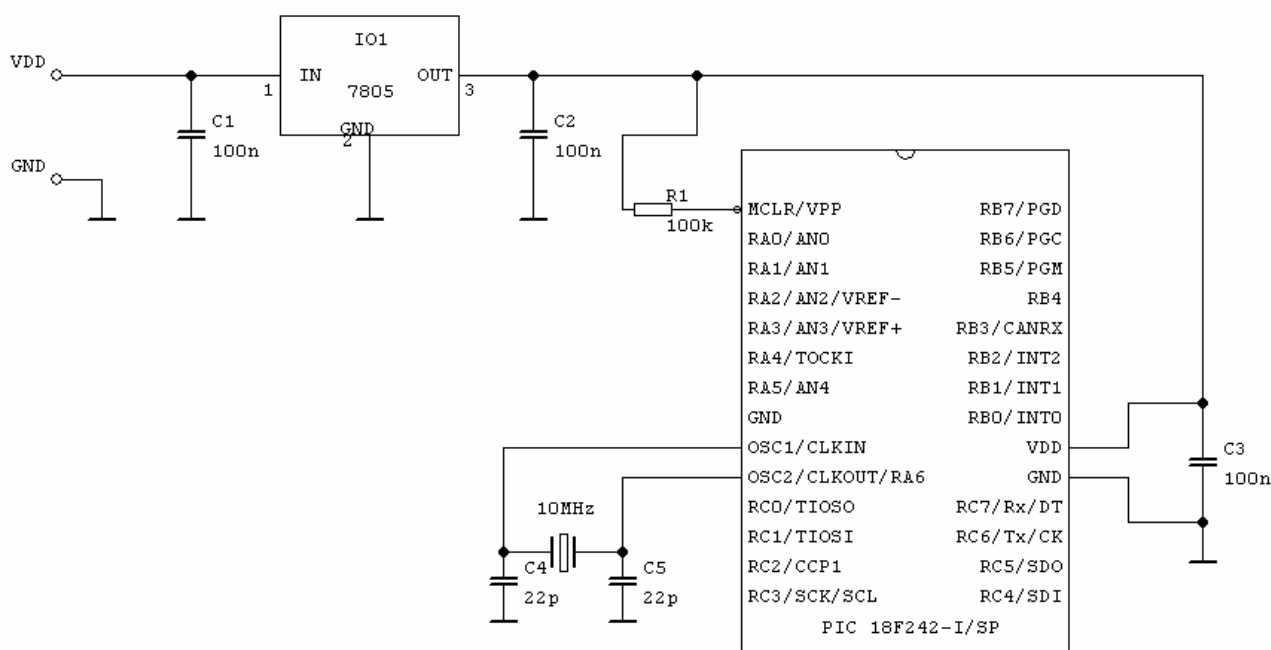
Cílem našich experimentů je změřit časové průběhy teploty na nejteplejším místě impulsně zatěžovaného rezistoru při různém výkonovém zatížení P a zatěživateli z (Obr. 8).



Obr. 8 Blokové schéma výkonového zatížení rezistoru

Na obr. 9, 10, 11 jsou ukázány vytvářené vstupní impulsy výkonu a měřené průběhy výstupní teploty na objektu podle parametrů uvedených v popise grafů. Doba trvání impulsu byla volena postupně 20, 30 a 40 ms a počet cyklů byl stanoven na 60 opakování. Proto hodnota zatěživatele byla postupně $z = 0,166, 0,231$ a $0,286$. Z průběhu je patrná odezva snímače a dosažení rovnovážného stavu ohřevu a ochlazení zatěžovaného objektu. Časové intervaly t_1 a t_2 jsou voleny s ohledem na možnosti maximálního zatížení měřícího prvku.

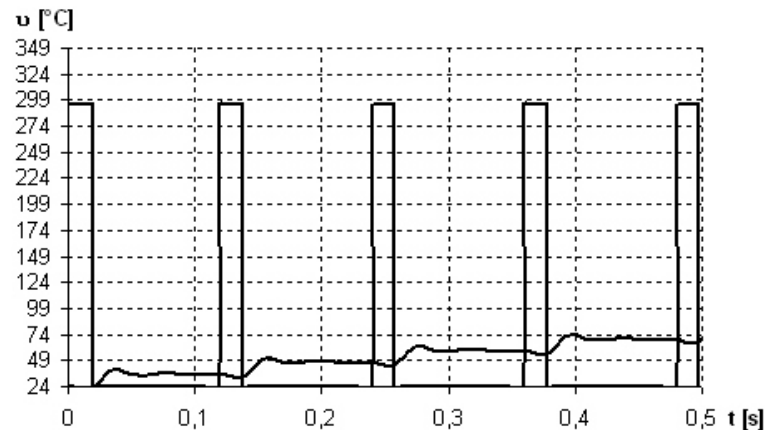
Při teplotě okolo 150°C už docházelo k poškození lakované vrstvy rezistoru. Po dosažení teploty 267°C byl ještě rezistor schopen práce, ale byl již natolik poškozený, že se nedaly zaručit jeho parametry. Podmínky zatěžování nejlépe vystihují práci analyzované součástky, která je umístěna uvnitř přístroje a není tedy ovlivňována podmínkami okolí.



Obr. 5 Elektrické schéma generátoru impulsů

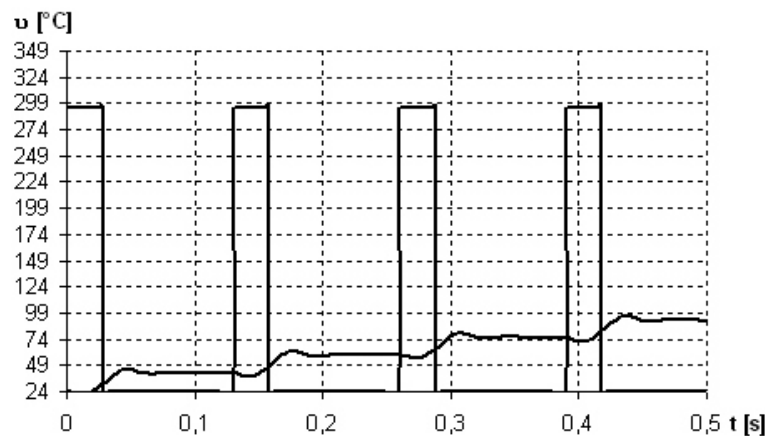


$t_i = 20 \text{ ms}$; $T = 120 \text{ ms}$; $z = t_i/T = 0,166$



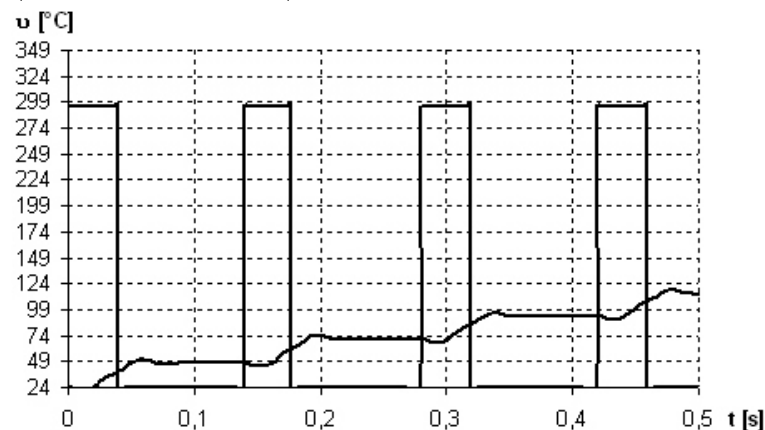
Obr. 9 Výkonové impulzy a odezva systému

$t_i = 30 \text{ ms}$; $T = 130 \text{ ms}$; $z = t_i/T = 0,231$



Obr. 10 Výkonové impulzy a odezva systému

$t_i = 40 \text{ ms}$; $T = 140 \text{ ms}$; $z = t_i/T = 0,286$



Obr. 11 Výkonové impulzy a odezva systému

V príspevku jsou ukázány přístupy a možné výsledky při měření rychlých průběhů teploty. Výstupem je grafická závislost reakce měřeného objektu na pulsní změnu jeho zatížení. V príspevku

jsou uvedeny zásady pro měření termočlánky, tedy možnosti jejich použití v kontextu s měřeným objektem. Realizovaná měření jsou nesporně zatížena dynamickou chybou, protože doby

trvání vytvářených výkonových impulsů jsou značně menší, než je časová konstanta celého měřicího řetězce. Proto v další výzkumné práci budou měření realizována s mikrotermočlánky.

Poznámka: Tento příspěvek vznikl na základě projektu ČZU: 31200 / 1312 / 313123.

Literatura

1. ĎAĎO, S. - KREIDL, M. Sensory a měřicí obvody. 2. vydání. Praha: ČVUT, 1999. 315s. ISBN 80-01-02057-6.
2. KÜNZEL, G. st. Matematické modely sdílení tepla v konstrukcích elektroniky. Praha: Academia nakladatelství Československé akademie věd., 1990.
3. LINDA, M. Dynamické vlastnosti různých typů snímačů teploty. Diplomová práce Praha: ČZU, 2008. 72s.
4. LINDA, M. – MAŠÍK, I. Webová podpora k výuce: Počítačové modelování dynamických systémů, Automatizovaného řízení technologických procesů a Teorie automatizovaného řízení. Změněno 6. 9. 2009 [cit. 2009-12-11]. Dostupné z: <<http://www.tf.imasik.cz>>.
5. PECEN, J. a kol., Fyzika. 5. vydání. Praha: ČZU – katedra fyziky, technická fakulta, 1999. 543s. ISBN 80-213-0523-1

In practice, we often come across the requirement of correct and accurate measurement of fast temperature variation in time. This article shows actual results of grant project, whose aim is to design centers for laboratory testing of static and dynamic parameters of different types of thermocouples (including microthermocouple with very small time constant) and assignment of accuracy. Power impulse generator was designed.

RESUME