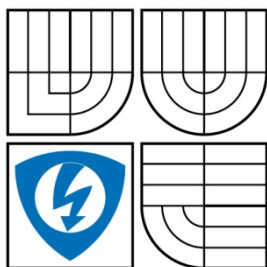


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

OPTIMALIZOVANÝ TERMODYNAMICKÝ SENZOR NA BILANČNÍM PRINCIPU

OPTIMIZED THERMO-DYNAMIC SENSOR WITH BALANCE PRINCIP

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAL ŘEZNÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. IVAN SZENDIUCH, CSC.

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Michal Řezníček
Bytem: Nedachlebice 233, 687 15
Narozen/a (datum a místo): 20.4.1983, Uherské Hradiště

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu

Vedoucí/ školitel VŠKP: Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

- ☐ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☐ elektronické formě – počet exemplářů 2

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 26.5.2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Tato práce se zabývá využitím bilančních termodynamických senzorů jako náhrady řešení s klasickými teplotními senzory. Je zaměřena na schopnost popisu chování termodynamické soustavy. Vybranou aplikací je monitorování ztrátového tepla ve válci pístového čerpadla. Práce popisuje také vliv okolní teploty a možnosti jeho potlačení pomocí termodynamického štítu. Porovnává přínosy navrženého řešení s dosud používanými klasickými postupy.

Abstract:

This work deal with taking advantage of balance thermodynamic sensors as the replacement of commercial temperature sensors. It is focused on description ability of thermodynamic system. Chosen application is monitoring of heat dissipation inside cylinder of the piston pump. Work describes also the ambient temperature influence and its elimination through the use of thermodynamic shield. It compares the chosen solution advantages to commercial designs.

Klíčová slova:

Termodynamický senzor, teplotní senzor, měření teploty, teplota okolí termodynamické soustavy, teplota jako stavová veličina, ztrátové teplo, šíření tepla, ustálený stav, přechodný děj, bilanční rovnováha, rovnovážné monitorování, simulace.

Keywords:

Thermodynamic sensor, temperature sensor, temperature measuring, ambient temperature thermodynamic systems, temperature as the state value, heat dissipation, heat diffusion, steady state, transient process, thermo balance, balance monitoring, simulation.

Bibliografická citace díla:

ŘEZNÍČEK, M. *Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické vedení a podporu při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji vedení spolupracující firmě HIT s.r.o, za materiální a technickou pomoc při realizaci funkčních vzorků.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Autor:	Bc. Michal Řezníček
Název závěrečné práce:	Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu
Název závěrečné práce ENG:	Optimized thermo-dynamic sensor with balance princip
Anotace závěrečné práce:	Tato práce se zabývá využitím bilančních termodynamických senzorů jako náhrady řešení s klasickými teplotními senzory.
Anotace závěrečné práce ENG:	This work deal with taking advatage of ballance thermodynamic sensors as the replacement of commercial temperature sensors.
Klíčová slova:	Termodynamický senzor, teplotní senzor, měření teploty, teplota okolí termodynamické soustavy, teplota jako stavová veličina, ztrátové teplo, šíření tepla, ustálený stav, přechodný děj, bilanční rovnováha, rovnovážné monitorování, simulace.
Klíčová slova ENG:	Thermodynamic sensor, temerature sensor, temperature measuring, ambient temperature thermodynamic systems, temperature as the state value, heat dissipation, heat diffusion, steady state, transient process, thermo ballance, ballance monitoring, simulation.
Typ závěrečné práce:	diplomová
Datový formát elektronické verze:	formát pdf
Jazyk závěrečné práce:	český
Přidělovaný titul:	Ing.
Vedoucí závěrečné práce:	Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
Škola:	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta:	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav:	Ústav mikroelektroniky
Studijní program:	Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor:	Mikroelektronika

Obsah

Termická senzorka a termické signalizátory	2
Ideální teploměr – teplotní senzor	3
Reálné teplotní senzory – stručný přehled a třídění	5
Lineární odporové senzory teploty	6
Aktivní odporové termodynamické senzory (RTDS)	8
Návrh RTDS a jeho zástavba do reálných termodynamických soustav	10
Základní termodynamické zapojení a vnitřní struktura RTDS – popis funkce	11
Základní pravidla přístupu	13
Modelování a simulace chování termodynamických soustav	14
Popis funkce modelu	18
Mapa vlastností prvků	19
Termodynamický senzor ve vybrané aplikaci	27
Jednoduchý RTDS jako regulátor paketového topného tělesa	28
RTDS signalizátor opotřebení válce pístového čerpadla	35
Realizace vzorků	40
Jednoduchý RTDS jako regulátor teploty	40
Zdvojený RTDS	47
Termodynamické zapojení	54
Závěr a doporučení	58
Seznam použitých zdrojů	61
Seznam použitých zkratk a symbolů	Chyba! Záložka není definována.
Seznam příloh	Chyba! Záložka není definována.

Termická senzorika a termické signalizátory

Pro monitorování, regulaci a signalizaci v termodynamických soustavách se používají termické senzory. Termodynamickou soustavou se rozumí prostorově ohraničená soustava hmotných objektů vzájemně si mezi sebou a na hranici s definovaným okolím směřující teplo. Každá soustava může obsahovat termicky aktivní a termicky pasivní objekty.

Stavovou veličinou, tedy i prostředkem popisu soustavy v čase je teplota. Každá fyzická termodynamická soustava se dá pro účely popisu dělit na elementární prvky, kterým lze potom přiřadit teplotu jako stavovou veličinu a sledovat její vývoj v čase (teplotní průběh), nebo podél množiny geometricky určených bodů soustavy (teplotní profil). Obdobně jako u objektů soustavy, rozlišují se i její elementární prvky na aktivní a pasivní. Pasivní i aktivní prvky skrze vlastní vymezené hranice sdílejí teplo s bezprostředně sousedícími prvky a toto mohou přechodně akumulovat ve vlastní hmotě. V daném čase je aktivní prvek navíc producentem nebo spotřebitelem tepla. Aktivní prvek může produkovat teplo přeměnou jiné formy energie na tepelnou či spotřebovávat teplo jeho přeměnou na jinou formu energie (elektrická, chemická, fyzikální, světelná, apd.). Okolí soustavy je vždy aktivním prvkem vně soustavy.

Termodynamická soustava se může vyskytovat buď v ustáleném, nebo neustáleném stavu. Ty lze vzájemně odlišit tak, že:

Ustálený stav je takový stav soustavy, kdy teploty všech jejích elementárních prvků setrvávají na konstantní teplotě, zůstávají tedy v určitém čase neměnné. O takovém časovém úseku, kdy všechny prvky soustavy vyhovují této podmínce lze jednoznačně prohlásit, že po dobu jeho trvání byla soustava v ustáleném stavu.

V soustavě bez aktivních prvků bude navíc platit, že teploty všech prvků i okolí budou shodné a vzájemné tepelné toky na hranicích prvků budou nulové (vymizí). V soustavě obsahující alespoň jeden trvale aktivní prvek stálé aktivity se ustálí teploty jednotlivých prvků na sice rozdílných, ale v čase stálých teplotách, mimo teploty se tedy ustálí i tepelné toky skrze hranice prvků. Libovolná změna aktivity byť i jen jediného aktivního prvku soustavy vyvolá změnu dříve ustálených poměrů v celé soustavě a uvede ji do neustáleného stavu. Pouze v případě, že změna aktivity aktivního prvku bude skoková a úroveň jeho nové aktivity setrvá nadále na sice nové, ale nadále stálé úrovni, ustaví se po čase také nová

termodynamická rovnováha a soustava přejde do nového ustáleného stavu. Ten ale bude přirozeně od předcházejícího odlišný. Neustálený stav mezi dvěma po sobě následujícími ustálenými stavy se nazývá přechodný děj. V ustáleném stavu je soustava ze znalosti ustálených úrovní stavové veličiny (teploty) všech jejích prvků analyticky popsitelná a objektivně poznatelná.

Bude-li naopak libovolný aktivní prvek soustavy vykazovat v čase spojitě proměnnou aktivitu, termodynamická rovnováha se neustálí a soustava bude trvale **neustálená**, stejně jako všechny její prvky, analytický popis pomocí teplot prvků bude obtížnější a soustava se stane méně poznatelnou. Periodické změny aktivit vyvolávají periodické bilanční změny, ty jsou v čase obecně předvídatelné, stejně jako stav soustavy, což naopak její poznatelnost zlepšuje.

Stav (okamžitý) termodynamické soustavy se obecně monitoruje prostřednictvím konečného počtu v soustavě vhodně rozmístěných senzorických prvků. Stavovou veličinou je teplota. Ideálním monitorovacím prvkem je prvek soustavu svou funkcí neovlivňující. Proto jsou nejčastěji používanými senzorickými prvky pasivní teploměry.

Ideální teploměr – teplotní senzor

Nemá-li ideální teploměr jako stavový monitorovací prvek ve funkci ovlivňovat monitorovanou soustavu, neměl by vykazovat žádnou termickou aktivitu ani akumulovat teplo, zato by měl mít se soustavou ideální tepelný kontakt. Nesmí tedy být ani producentem, ani spotřebitelem tepla, musí ideálně sdílet teplo s okolím a sám žádné teplo neakumulovat. První dvě podmínky se týkají principu převodu teploty (stavová veličina) na odečitatelný (dnes již zpravidla elektrický) signál, druhé dvě se týkají jeho vlastní konstrukce a zástavby do monitorované soustavy.

Z definice tepelné kapacity C_T a tepelné vodivosti λ_T :

$$C_T = \frac{\Delta P_a}{m \cdot \Delta T} \quad \text{a} \quad \lambda_T = \frac{p \cdot x}{S \cdot \Delta T_x} \quad (1)$$

ΔP_a	nárůst akumulovaného výkonu
m	hmotnost prvku
ΔT	přírůstek teploty prvku v čase
p	mezi dvěma sousedními prvky sdílením přenesený výkon
x	přenosová vzdálenost (vzdálenost sousedních prvků), tedy $x = x_2 - x_1$
S	společná hraniční plocha sousedních prvků
ΔT_x	vzájemný rozdíl teplot prvků sdílejících teplo, tedy $\Delta T_x = T(x_2) - T(x_1)$
x_2 a x_1	souřadnice prvku příslušné směru sdílení

a uvážením, že:

$$\Delta P_a = (p_A + \sum_i p_i) \cdot \Delta t \quad (2)$$

p_A	je okamžitá vlastní aktivita prvku
p_i	je okamžitý sdílený výkon s i-tým sousedním prvkem
Δt	je doba po kterou aktivita a interakce (sdílení) trvala, tedy $\Delta t = t_2 - t_1$

v tomto tvaru se předpokládá, že jak aktivita, tak interakce byly od okamžiku t_1 do okamžiku t_2 stálé.

Pro nestálé aktivity a interakce je třeba inkrementovat čas co nejpodrobněji, odtud diferenciální tvar:

$$\frac{dP_a}{dt} = (p_A + \sum_i p_i) \quad \text{a z (1) obdobně} \quad \frac{dP_a}{dt} = m \cdot C_T \cdot \frac{dT}{dt}$$

odtud potom monitorovaná veličina diferenciálně:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m \cdot C_T} \cdot \frac{dP_a}{dt} = (p_A + \sum_i p_i)$$

a po integraci teplota jako užitečná stavová veličina:

$$T(t) = \frac{1}{m \cdot C_T} \cdot \int \frac{dP_a}{dt} dt = \int (p_A + \oint_S p dS) dt \quad (3)$$

Odtud je zřejmé, že vlastní aktivita teplotního senzoru p_A ovlivňuje jak pravdivost údaje o monitorované veličině, tak vlastní monitorovanou soustavu. Má tedy být $p_A \rightarrow 0$. Dynamiku údaje (citlivost a zpoždování v čase) potom nepřímo úměrně ovlivňuje vlastní hmotnost m a tepelná kapacita C_T těla senzoru a má být $m \rightarrow 0$ a $C_T \rightarrow 0$.

Současně lze usoudit, že v zástavbě se teplotní snímač (teploměr) stává integrálním prvkem monitorované soustavy a prostřednictvím vlastní teploty monitoruje svou interaktivitu s bezprostředním okolím soustavy. Okamžitý údaj je zcela věrohodný, je-li celá soustava v ustáleném stavu, tj. v časových úsecích, kdy $T = \text{konst.}$

Reálné teplotní senzory – stručný přehled a třídění

Podle principu převodu a vizualizace

- Termo-mechanicko-optické (založení na vizualizaci délkové nebo objemové roztažnosti α_T látek v závislosti na teplotě) jako rtuťové teploměry, spirálové teploměry apod.
- Termo-elektrické (využívající teplotní závislosti elektrických veličin, vlastností materiálů či jejich kombinací)
 - o Termočláňkové (termoelektrické napětí na styku dvou kovů)
 - o Termické (využívající změny elektrických vlastností materiálu s teplotou)
 - Odporové (změna odporu materiálu na teplotě)
 - Lineární (RTD)
 - Nelineární (termistory apod.)
 - Nepřímé (monitorující výkonovou inter-aktivitu prostřednictvím vlastní aktivity potřebné k udržení sebe sama na konstantní teplotě)
- Termo-optické (pyrometry, infra-kamery)

S postupující automatizací procesů narůstá význam potřeby zpracování a dálkového přenosu informací, proto narůstá význam senzorů umožňujících přímý nebo zprostředkovaný

převod na měřitelný elektrický signál. Nejpoužívanějšími se staly lineární RTD odporové senzory a termočlánky.

Lineární odporové senzory teploty

Dále jen RTD (Resistor Temperature Dependent).

V zásadě využívají materiálové teplotní závislosti odporu definované koeficientem teplotní závislosti TCR (Temperature Coefficient of Resistance) jako:

$$TCR = \frac{R(T) - R_0}{R_0 \cdot [T - T_0]} \quad (4)$$

$R(T)$ je hodnota odporu při dané teplotě T

$R(0)$ je hodnota odporu při teplotě odpovídající počátku zvolené teplotní stupnice, tedy při teplotě $T(0)=0$

Odtud potom:

$$R(T) = R_0 + R_0 \cdot TCR \cdot (T - 0) = R_0 \cdot (1 + TCR \cdot T) \quad (5)$$

Nebo:

$$T = \frac{1}{TCR} \cdot \left[\frac{R(T)}{R_0} - 1 \right] = \frac{1}{R_0 \cdot TCR} \cdot [R(T) - R_0] \quad (6)$$

Pro dobrou dlouhodobou stabilitu základní hodnoty a koeficientu TCR se jako materiál funkční vrstvy používá zpravidla Platina (Pt) s $TCR = 0,00385 \text{ [K}^{-1}\text{]}$ nebo nikl (Ni) s $TCR = 0,00618 \text{ [K}^{-1}\text{]}$, alternativně $TCR = 0,00500 \text{ [K}^{-1}\text{]}$. Někdy se hodnota TCR uvádí také v 10^6 násobku jako např. pro platinu 3850 [ppm/K]. Výchozí hodnota odporu pro počátek teplotní stupnice se volí zpravidla 100 nebo 1000 [Ω] a uvádí se v označení senzoru (např. Pt100 nebo Ni1000).

Vyrábí se vinuté z tenkého Pt drátku na nosných válečkových keramických tělískách nebo jako vrstvé na plochých keramických substrátech. Všechny verze jsou opatřeny vývody pro zapojení do měřicího elektrického obvodu. Z hlediska použité technologie se vinuté vyrábějí na navíjecích strojích, podle průměru a použitého materiálu se určí měrný odpor na délku odpovídající jednomu závitě a rovnoměrně se vine potřebný počet závitů na dosažení správné hodnoty odporu.

Vrstvé mohou být buď přímo tištěné (zpravidla sítotiskem) na běžných substrátech (tzv. tlusto-vrstvé), nebo fotolitograficky vytvářené či laserově opracovávané z vrstvého sendviče (zpravidla Pt-Ti-Pd-Au nebo Ni-Ti-Pd-Au, alternativně Ni-Cu-SnPb) vytvořeného některou z metod vakuové depozice (napařování, naprašování, vf či magnetronové naprašování).

Napětový elektrický signál o okamžité hodnotě odporu se odebírá ze senzoru napájeného konstantním proudem (zpravidla 1 mA u Pt100 či Ni100 nebo 100 μ A u Ni1000). Vlastní výkonová aktivita senzoru potom představuje v rozpětí Celsiovy teplotní stupnice (0-100 °C) cca 100 až 138 μ W u Pt100, cca 100 až 162 μ W u Ni100 a Ni1000, alternativně 100 až 150 μ W u Ni100 a Ni1000 s TCR=5000 [ppm/K]. Napětová převodní strmost charakteristiky $\Delta U/\Delta T$ je potom 0,38 mV/K u Pt senzorů a 0,618 mV/K u Ni senzorů, alternativně 0,5 mV/K u Ni senzorů s TCR=0,00500 [K⁻¹].

Senzory zabudované do jímek průmyslových teploměrů se k zabudovanému nebo vnějšímu převodníku připojují dvou, tří nebo čtyř-drátově. Tří a čtyř drátovým připojením se kompenzuje vliv konečného odporu připojovacích vodičů. V takovém případě se odlišují napájecí proudové svorky od napětových svorek pro odběr užitečného signálu senzoru. Převodníkem je užitečný signál vyhodnocen a převeden na některý z průmyslových standardů, zpravidla na signál 4-20 mA, alternativně 0-20 mA, 0-10 V způsobilý přenosu do dispečinku s centrálním řídicím systémem procesu (střední vzdálenost). Převodníky mohou mít pevně nastavený převodní rozsah (např. 0-50 °C/4-20 mA), přestavitelný rozsah (SMART), dálkově protokolárně přestavitelný rozsah (SMART HART). Někdy bývá signál senzoru převeden také do digitální podoby a protokolárně přenášen také v podobě datového údaje prostřednictvím některé ze standardizovaných datových sběrnic (CAN BUS, RS232, RS485 apod.).

Definice převodní citlivosti senzoru pomocí TCR podle [1] předpokládá linearitu převodní charakteristiky v celém využívaném rozsahu teplot v dané aplikaci. U TCR jako materiálové vlastnosti funkční vrstvy předpokládá, že v celém využívaném rozsahu zůstává konstantní. Ve skutečnosti i čistá platina nebo nikl vykazuje určité odchylky. Proto se při zvlášť přesných měřeních používají korigované převodní charakteristiky. Pro příklad uvádím nejpoužívanější normovanou charakteristiku čisté platiny, definované podle DIN EN 60751.

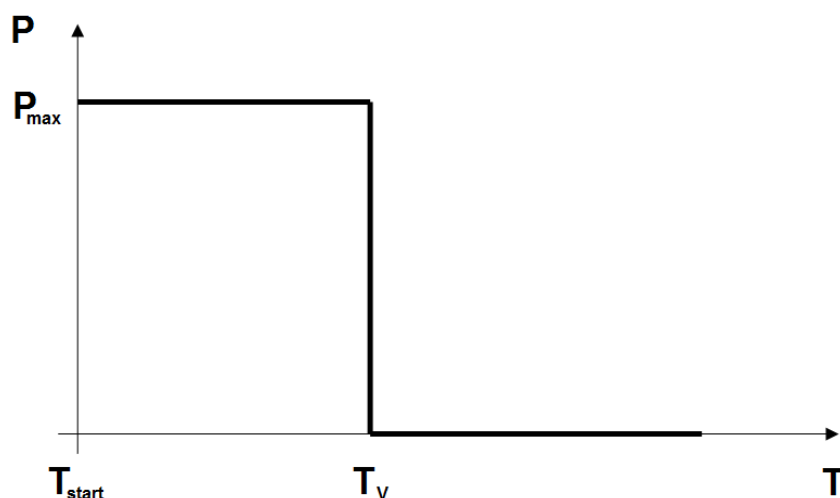
Pro $T \geq 0^\circ\text{C}$ je $R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$, kde $A = 3908,3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$,
 $B = -0,5775 \text{ ppm}/^\circ\text{C}^2$ při $R(0)=100 \Omega$

Pro $T < 0^\circ\text{C}$ je $R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100^\circ\text{C}) \cdot T^3)$, kde A i B jsou totožné s předcházejícími a $C = -0,4183 \cdot 10^{-6} \text{ ppm}/^\circ\text{C}^4$ opět při $R_0 = 100 \Omega$.

Jednotlivé senzory se vlivem rozptylu materiálových vlastností a limitní přesnosti a opakovatelnosti použité technologie od této normované převodní charakteristiky mohou odlišovat a podle velikosti odchylky se kategorizují do tříd (přesnosti) označovaných jako třída A či třída B (někdy i nejlevnější třída C). Maximální povolená odchylka zjištěné teploty od skutečné je u senzorů ve třídě A $dT = \pm(0,15 + 0,002 \cdot |T|)^\circ\text{C}$ a ve třídě B $dT = \pm(0,3 + 0,005 \cdot |T|)^\circ\text{C}$. V běžných praktických aplikacích se vystačí s definiční charakteristikou podle [2].

Aktivní odporové termodynamické senzory (RTDS)

Podle definice [2] je RTDS termo-aktivní prvek termodynamické soustavy udržovaný vlastní poznatelnou termo-aktivitou v trvale rovnovážném stavu, tedy trvale na jemu vlastní konstantní teplotě. Podle téhož zdroje [2] má jeho ideální charakteristika tvar podle Obr.1.



Obr. 1: Výkonově teplotní charakteristika ideálního pozitivně aktivního RTDS

p	okamžitý příkon senzoru
$p_{\max}$	maximální disponibilní příkon zapojení
T	okamžitá teplota senzoru
T_v	charakteristická vlastní teplota senzoru
T_{start}	klidová počáteční teplota senzoru

Z termodynamického hlediska to znamená, že i v situacích, kdy ostatní prvky termodynamické soustavy nejsou v ustáleném stavu, RTDS setrvává teplotně v ustáleném stavu (na vlastní konstantní teplotě) a termicky potom v bilanční rovnováze, to znamená, že okamžitá interakce RTDS s vlastním okolím soustavy je kompenzována okamžitým příkonem senzoru.

Je-li celá termodynamická soustava (včetně RTDS jako jejího aktivního prvku) v ustáleném stavu je i RTDS plnohodnotně v ustáleném stavu (ustálené teploty i tepelné toky), a vlastní příkon senzoru představuje užitečný signál nesoucí věrohodnou informaci o stavu systému jako celku.

Je-li celá termodynamická soustava v neustáleném stavu (přechodný nebo přechodový děj) je RTDS teplotně v ustáleném stavu a termicky v proměnné bilanční rovnováze a jeho užitečný signál věrně popisuje okamžitý vývoj teplotních toků v soustavě prostřednictvím své

okamžité interakce s vlastním bezprostředním okolím soustavy. To lze snadno dovodit ze (2) v diferenciálním tvaru, neboť pro RTDS při $T=\text{konst}$ musí zřejmě být:

$$\frac{dP_a}{dt} = (p_A + \sum_i p_i) = 0 \quad \text{a odtud} \quad p_A = -\sum_i p_i \quad (7)$$

Oproti zprostředkovanému monitorování aktivit uvnitř termodynamických soustav pasivními RTD senzory prostřednictvím teploty odpadá problematický převod aktivity na teplotu podle (6) avšak za cenu, že při návrhu zástavby RTDS do soustavy musíme počítat s aktivním ovlivněním soustavy vlastní aktivitou senzoru (nový přístup). U celé řady aplikací se s tím lze docela snadno vyrovnat, u jiných (zejména regulovaných soustav) to může být dokonce výhodné. V krajním případě (u malých soustav) může RTDS představovat kombinovaný senzor a výkonný člen v jednom, nebo dokonce celou monitorovanou či regulovanou soustavu interagující pouze s vnějším okolím takové integrované soustavy.

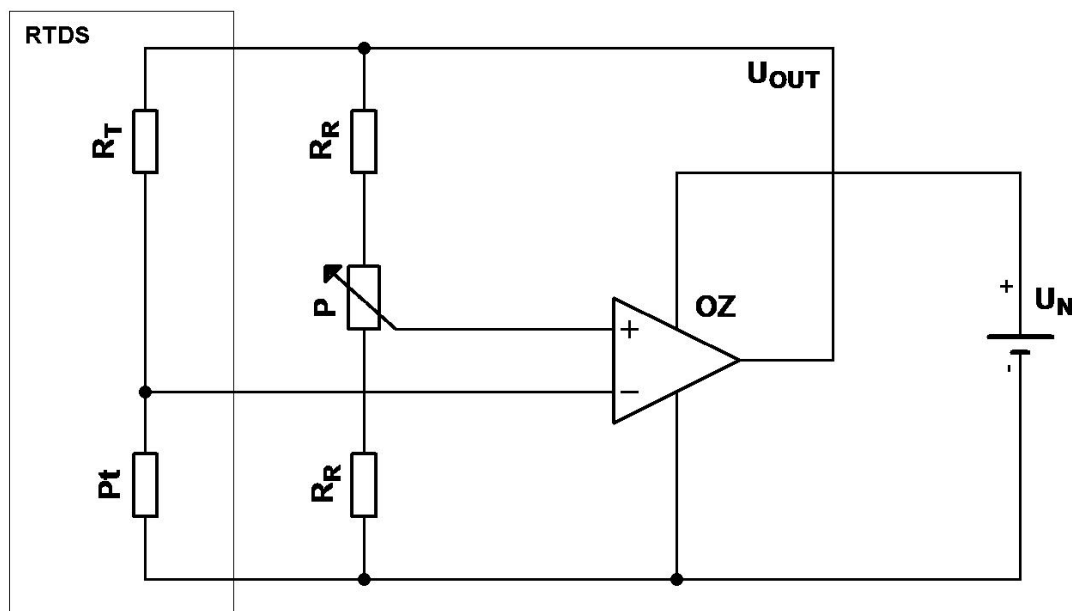
Návrh RTDS a jeho zástavba do reálných termodynamických soustav

Na rozdíl od klasického přístupu, kdy se projekt měření a regulace založený na využití RTD teplotních senzorů teprve na prakticky hotovou aplikační soustavu (pasivní RTD s $p_A \rightarrow 0$ soustavu termicky prakticky neovlivní) je u RTDS senzorů s ovlivněním soustavy vlastní aktivitou senzoru nutné počítat, případně jí výhodně využít. RTD se zpravidla k dané soustavě vybírá ze sortimentu standardizovaných provedení podle aplikačních požadavků odvozených z vlastností soustavy, RTDS se naopak účelově navrhuje jako aktivní nedílná součást soustavy již na základě požadavků kladených na funkci soustavy jako aplikace. I když se určitá typizace a standardizace v budoucnu dá očekávat i u nových generací RTDS. RTDS přesto nelze a ani v budoucnu nepůjde chápat jako prostou náhradu jiných teplotních senzorů, RTD senzory nevyjímaje.

Počáteční využití RTDS senzorů se dá tedy očekávat spíše v účelových aplikacích, kde monitorování prostřednictvím teploty naráží na aplikační meze (přesnost, zástavbové rozměry, převodní citlivost apod.) nebo vůbec selhává. Jen v takových případech se může RTDS konkurenčně uplatnit, jednodušší technické řešení může být levnější a uplatnění nového přístupu může přinést nové užité vlastnosti.

Základní termodynamické zapojení a vnitřní struktura RTDS – popis funkce

Precizní zapojení, kde struktura RTDS představuje velmi přesné, navíc dostavitelné zapojení pro měření malých rozdílů teplot či teplotních odchylek bylo publikováno v příbuzných verzích ve [2], [3], [4] a [6]. Důkaz setrvání na konstantní teplotě, tedy splnění podmínky: $\Delta T \rightarrow 0$, respektive $\Delta T = 0$ byl proveden v [6], proto se omezím na zjednodušenou schematickou verzi pro nenáročné aplikace viz Obr.2.



Obr.2: Příklad jednoduchého RTDS v ideálním bilančním zapojení

Stručný popis funkce

Připojení napájecího napětí U_N ideálnímu operačnímu zesilovači IOZ ve stavu, kdy dělicí poměr větve rezistorů $R_R + P + R_R$ definovaný polohou jezdce potenciometru P je větší, než dělicí poměr $P_t / (P_t + R_T)$ dvojice rezistorů RTDS jej aktivuje a na jeho výstupu se objeví plné výstupní napětí U_{OUT} o velikosti U_N snížené o saturační úbytek na plně otevřeném výstupním prvku (tranzistoru) vnitřní struktury OZ. Senzoru RTDS je tedy dodáván plný disponibilní příkon zapojení ($\approx U_N$) kterým je v podobě ztrátového tepla obou rezistorů (P_t a

R_T) ohříván. Teplota RTDS roste a spolu s ní i odpor rezistoru P_t s TCR platiny stejně jako napětí na vstupu $-In$ IOZ. To vše až do okamžiku dosažení stavu, kdy napětí na vstupu $-In$ dosáhne úrovně shodné s napětím na vstupu $+In$. Po té výstupní napětí U_{out} prudce klesne na úroveň zaručující senzoru dodávku okamžitého výkonu právě potřebného k jeho udržení na teplotě definované podmínkou shody napětí na vstupech $-In$ a $+In$. Tuto podmínku lze psát jako:

$$U_{out} \cdot \frac{P_t}{R_T + P_t} = U_{out} \cdot \frac{R_R + \alpha \cdot P}{R_R + P + R_R}$$

P_t , R_T , R_R a P hodnoty odporů shodně značených resistorů a potenciometru
 α představuje poměrné nastavení jezdce potenciometru P

po vykrácení veličiny U_{OUT} s využitím (5) snadno převést do tvaru:

$$\frac{P_{t0} \cdot (1 + TCR \cdot T)}{R_T} + 1 = 1 + \frac{(1 - \alpha \cdot P)}{2 \cdot R_R + P}$$

P_{t0} hodnota odporu rezistoru P_t při teplotě 0°C (počátek stupnice)

Odtud již lze vyjádřit:

$$T = \frac{1}{TCR} \cdot \frac{R_T - 1 - \alpha \cdot P \cdot R_T}{P_{t0} \cdot (2 \cdot R_R + P)}$$

Je zřejmé, že při nastavení jezdce potenciometru do polohy $\alpha = 0,5$ nastavíme senzoru teplotu na hodnotu korespondující s jemu vlastní teplotou definovanou rovností:

$$R_T = P_{t0}(1 + RCT \cdot T) \quad (8)$$

tedy na teplotu, při níž jsou hodnoty odporů obou rezistorů shodné. Přestavením polohy $\alpha \in < 0,1 >$ potom skutečnou pracovní teplotu představuje symetricky a lineárně kolem ní v rozsahu definovaném poměrem $\frac{P}{2 \cdot R_R}$

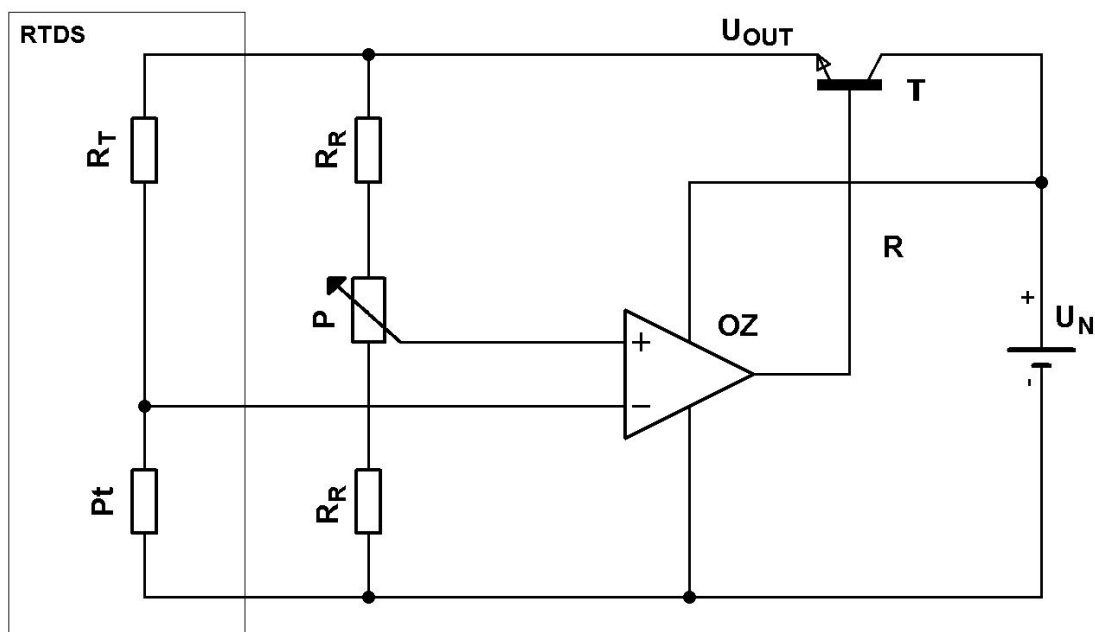
Maximální disponibilní příkon senzoru můžeme orientačně určit jako

$$p_{max} = \frac{U_n^2}{2 \cdot R_R} \quad (9)$$

Základní pravidla přístupu

- a) RTDS se navrhuje pro danou aplikaci tzv. na míru jako její nedílná součást
- b) RTDS se do soustavy umísťuje tak, aby bylo dosaženo vysoké citlivosti na tu z aktivit soustavy, která je přednostně objektem monitorování (našeho zájmu)
- c) Ze základní představy o budoucí funkci navrhované soustavy se orientačně zjistí maximální a minimální pracovní teplota v místě instalace RTDS bez funkce
- d) Vlastní teplotu senzoru stanovíme jako přiměřeně vyšší než podle bodu c) zjištěná maximální pracovní
- e) Maximální potřebný (disponibilní) příkon RTDS určíme tak že pro RTDS ve funkci zjistíme jeho interakci při situaci korespondující se stavem, při němž byla zjištěna minimální pracovní teplota v místě instalace podle bodu c)
- f) Z tohoto příkonu s využitím (9) určíme hodnotu odporu rezistoru R_T a následně s využitím (8) také hodnotu P_{t_0}
- g) Se znalostí takto stanovených základních termických a elektrických parametrů konstrukce RTDS a geometrické představy o zástavbě rozhodneme o základním provedení (vinutý, vrstvý na válcovém či plochém tělísku) a s respektováním geometrické představy vybereme vhodnou realizační technologii a s respektováním pro ni platných technologických pravidel provedeme návrh
- h) Na základě návrhových předpokladů podle bodu e) navrhujeme výkonově přizpůsobenou variantu termodynamického zapojení podle obr. 3
- i) Vybranou technologií zrealizujeme funkční vzorek podle návrhu a ověříme dosažení základních návrhových parametrů senzoru

- j) Ověřený funkční vzorek instalujeme v místě zástavby do originální soustavy nebo její makety a provedeme funkční zkoušku
- k) Na základě výsledků funkční zkoušky případně upravíme návrh RTDS či zapojení



Obr. 3: Příklad jednoduchého RTDS ve výkonově přizpůsobeném bilančním zapojení

Výkonové přizpůsobení zapojení podle Obr.3 spočívá v jeho rozšíření o výkonový výstupní tranzistor volený tak, že jeho povolená výkonová ztráta musí vyhovět podmínce $P_{Tmax} \geq p_{max}/2$

Modelování a simulace chování termodynamických soustav

Problematikou modelování a simulací chování termodynamických soustav se zabývá celá řada profesionálních komerčních firem, které nabízejí k dodání různá programová vybavení umožňující dostatečně podrobný popis soustav, jejich fyzikálně matematickou

interpretaci, výkonné matematické rutiny a solvery pro generování výstupních formátů podle potřeby uživatele. (ANSYS, FLOMERICS, COMSOL MULTIPHYSICS, BETASOFT, THERMO ANALYTICS, NETZSCH THERMAL SIMULATIONS, atd.)

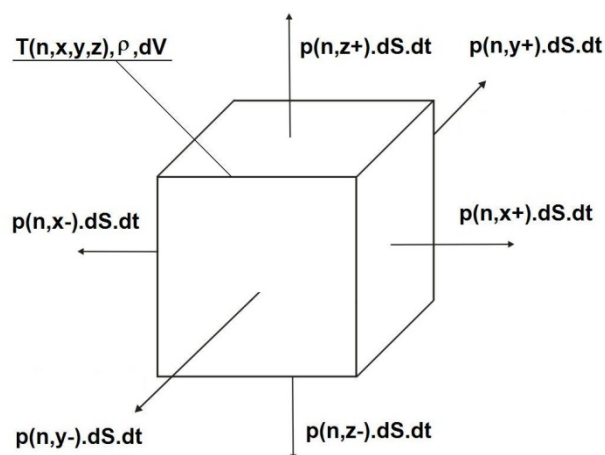
Prakticky všechny jsou založeny buď na využití metody konečných prvků nebo konečných diferencí. Základem je vždy segmentování soustavy na dostatečně malé elementární prvky. Každému prvku se přednostně přiřadí podle vhodně zvoleného souřadnicového systému jeho souřadnicová pozice v systému pak materiálové vlastnosti podle geometrické příslušnosti k jednotlivému konstrukčnímu dílu soustavy (teplotní vodivost, měrná tepelná kapacita a měrná hmotnost, případně vlastnosti rozhraní či fyzikální vlastnosti popisující podmínky fázových či strukturálních přeměn), po té schopnost a míra vlastní aktivity matematická transformační rutina k určení charakteristických přenosových vlastností k bezprostředně sousedícím prvkům a posléze matematická rutina pro výpočet přírůstku teploty prvku za definovaný časový krok vlivem interakce s vlastními sousedními prvky a případné vlastní aktivity. Obdobně jsou přiřazeny také vlastnosti a míra aktivity a matematické rutiny segmentům soustavě bezprostředního okolí.

Nakonec se definuje výchozí, zásadně rovnovážný stav soustavy (zpravidla odpovídající soustavě bez vlastních aktivit, která dlouhodobě setrvávala v ustáleném prostředí (okolí). To představuje stav, kdy výchozí teplota všech prvků soustavy je shodná s teplotou okolí. Žádný z nich sice zatím plnohodnotně nezná prvek typu RTDS (poznatelná aktivita udržující jej na určené konstantní teplotě). Některé (např. FLOMERIX) modelově znají pojem prvku setrvávajícího na definované teplotě, schází jim tedy jen rutina a solver pro generování v čase interakcí odvedeného tepla do okolí, tedy výkonu vlastní aktivity tuto interakci kompenzující. Problematika přizpůsobení vybraných programových vybavení (ANSYS, FLOMERICS a MULTIPHYSICS) je předmětem řešení jiných prací, bohužel termínovaných tak, že případná úspěšná řešení ještě nešlo využít jako prostředek k modelování členitých soustav či topologií RTDS a optimalizovat v rámci této práce zpracovaných návrhů.

Pro vlastní potřebu jsem vytvořil v prostředí EXCEL několik základních verzí výpočetních rutin umožňujících alespoň ověření jejich funkčnosti. Vzhledem k omezené výpočetní kapacitě byly modely maximálně zjednodušeny využitím geometrických souměrností a podobně. Pro přiblížení přístupu k řešení popisují dále jeden z vybraných.

Základní teorie tvorby modelu byla v různých modifikacích publikována v [2],[3],[4], podle nichž pro kubické segmentování bude:

Základní model interakce skrze plochy jednotkového elementárního prvku za jednotkový čas je znázorněn na Obr.4.



Obr.4: Znázornění termodynamické interakce systémového elementu

Interakce v různých směrech mohou být různé, proto je třeba odlišit povrchové plochy v opačných směrech $dS(x+)$ and $dS(x-)$. Pro tento případ lze pro obecně n -tý časový interval vyjádřit teplo k akumulaci v inkriminovaném k -tém prvku jako:

$$P(n,k) = \sum_k p(n,k+) + p(n,k) \quad (10)$$

$P(n,k)$	výkon k akumulaci
$p(n,k+-)$	tepelná interaktivita elementu v definovaném směru
$p(n,k)$	vlastní aktivitou prvku dodávaný výkon
n	pořadové číslo aktuálního vyšetřovaného intervalu (časového kroku sekvence)
k	definuje aktuální vyšetřovaný prvek (souřadnicově)
$k+$ a $k-$	representují vyšetřovaný směr a orientaci k sousednímu elementu

Tepelnou (výkonovou) interaktivitu elementu $p(n, k+)$ pro jednotlivý směr vybrané osy lze určit pomocí jednoho z následujících vztahů:

$$p(n, k+) = \frac{T(n, k) - T(n, k+1)}{R(k, k+1)} \quad p(n, k-) = \frac{T(n, k) - T(n, k-1)}{R(k, k-1)} \quad (11)$$

$R(k, k+1)$ a $R(k, k-1)$ tepelné odpory mezi sousedními elementy
 $T(n, k)$, $T(n, k+1)$ a $T(n, k-1)$ aktuální teploty sousedních elementů v různých směrech vybrané osy

Přitom $R(k, k+1) = \frac{R(k) + R(k+1)}{2}$ a obdobně $R(k, k-1) = \frac{R(k) + R(k-1)}{2}$ (11a)

$R(k)$ tepelný odpor k-tého prvku
 $R(k+1)$ tepelný odpor prvku (k+1)
 $R(k-1)$ tepelný odpor prvku (k-1)

Teplota libovolného elementu v daném časovém kroku může být určena z teploty zjištěné v kroku předcházejícím jako:

$$T(n, k) = T(n-1, k) + \frac{P(n, k)}{c(k)\rho(k)} \quad (12)$$

Kde:

- Symboly $c(k)$ a $\rho(k)$ jsou měrné materiálové konstanty elementu
- Symboly k a n jsou z definičních oborů $k \in \{x, y, z\}$ a $n \in R$

To, že rozměry elementu a časový úsek jsou jednotkové, znamená, že:

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1, dS = 1, dV = 1$$

$\Delta t = t(n) - t(n-1) = 1$ a symbol n představuje aktuální čas, neboť: $t(n) = n\Delta t = n$

Ne-li, musí se zavést geometrická a časová měřítka. Zvolíme-li je jako násobky základních jednotek,

$$\text{bude: } \Delta x = \Delta y = \Delta z = M_g, dS = M_g^2, dV = M_g^3 \quad \text{a} \quad \Delta t = t(n) - t(n-1) = M_t$$

V důsledku toho je s uvážením (1):

$$R(k) = R_T(k) \cdot \frac{M_g^2}{M_g} = R_T(k) \cdot M_g \quad \text{a vztahy (11) a (12) přejdou do tvaru:}$$

$$p(n, k+) = \frac{T(n, k) - T(n, k+1)}{M_g \cdot R_T(k, k+1)} \quad p(n, k-) = \frac{T(n, k) - T(n, k-1)}{M_g \cdot R_T(k, k-1)} \quad (11a)$$

$$T(n, k) = T(n-1, k) + \frac{M_t \cdot P(n, k)}{c(k) \cdot \rho(k) \cdot M_g^3} \quad (12a)$$

Člen P(n,k) lze rozepsat na jednotlivé složky kubické soustavy a vztah (12a) se tak dá převést do podoby způsobilé k použití jako prvku automatické výpočetní rutiny

$$\begin{aligned} T(n, k) = & T(n-1, k) + \frac{M_t}{c(k) \cdot r(k) \cdot M_g^3} \cdot \left(p(n, k) + \frac{T(n-1, x) - T(n-1, x+1)}{M_g \cdot R_T(x, x+1)} + \right. \\ & + \frac{T(n-1, x) - T(n-1, x-1)}{M_g \cdot R_T(x, x-1)} + \frac{T(n-1, y) - T(n-1, y+1)}{M_g \cdot R_T(y, y+1)} + \frac{T(n-1, y) - T(n-1, y-1)}{M_g \cdot R_T(y, y-1)} + \\ & \left. + \frac{T(n-1, z) - T(n-1, z+1)}{M_g \cdot R_T(z, z+1)} + \frac{T(n-1, x) - T(n-1, z-1)}{M_g \cdot R_T(z, z-1)} \right) \end{aligned}$$

Popis funkce modelu

Geometrický tvar je např. u podle osy $x=0$ osově symetrických objektů plně reprezentovatelný kterýmkoliv z řezů v rovině $z=0$ nebo $y=0$. Příklad takového řezu je uveden na Obr.5.

		x																	y,z	
		-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8		
5	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	5	
4	o	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	o	4
3	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	o	3
2	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	h	h	h	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	o	2
1	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	h	h	h	i	i	i	i	i	i	i	i	o	1
0	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	h	h	h	b1	s	b1	š	b1	b1	b1	b1	o	0
-1	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	h	h	h	i	i	i	i	i	i	i	i	o	-1
-2	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	h	h	h	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	o	-2
-3	o	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	b2	o	-3
-4	o	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	o	-4
-5	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-5
x		-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8		

Obr.5: Příklad řezu osově symetrickou soustavou k simulaci

Prvky **h** zde reprezentují topidlo, prvky **b2** tělo soustavy, prvky **i** izolace, prvky **b1** tělo snímače se dvěma RTDS a prvky **S** a **š** dva rozdílné RTDS, jeden označený jako S ve funkci senzoru a druhý, označený jako š ve funkci termodynamického štítu. Jeho funkci osvětlím později. Označení **z,y** v levém sloupci symbolizuje rovnocennost řezů v rovinách $z = 0$ a $y = 0$.

Uvedený model trojrozměrně reprezentuje $11 \times 11 \times 17 = 2057$ jednotlivých prvků soustavy. Můžeme-li však okolí reprezentované symbolem **o** považovat za homogenní (jinak by termodynamicky neplatilo pravidlo symetrie), postačí matematicky řešit pouhých $6 \times 17 = 102$ prvků. Chování všech ostatní se dá přiřadit podle pravidel symetrie. To je ale poněkud obtížné pro automatické generování rozvrhu prvků, proto generujeme plný počet prvků řezu, to je $11 \times 17 = 187$. V tomto případě se prostě využívá rovnocennosti označování prvků podle souřadnic y a z , což matematicky představuje zápis $(x,y) = (x,z)$ a $(x,y,z) = (x,z,y) = (x,y)$.

Mapa vlastností prvků

Ke každému druhu prvku (v našem případě h,b2,b1,S,š a o) se určí materiál (někdy i zástupný) k němuž se z databáze materiálu a zástupných prvků vytvoří řádková matice vlastností, tj. R_T , ρ a c_T . Příklad takové tabulky je patrný v Tab.1.

Prvek	Druh	Materiál	R_T	ρ	c_T
h	topidlo	Mosaz	2	5500	100
c	Chladič	Cu	2	8960	100
i	Izolace	izolace	15	1350	100
š	Štít	keramika	4	2500	100
S	TDS	keramika	4	2500	100
b2	Tělo	Fe	3	7870	100
b1	Tělo	Fe	3	7870	100
o	Okolí	vzduch	50	1,276	100

Tab.1: Příklad tabulky materiálových vlastností

Při generování mapy prvků uspořádaných do souvislé řady sloupců s opakováním podle počtu prvků podél osy x se podle této tabulky každému prvku přiřadí jeho vlastní materiálové charakteristiky.

p.č.	1	24	41	60	91	94	96	97	98	99	100	115	145	187
x	-8	-2	-2	0	-3	0	2	3	4	5	6	4	0	8
y,z	-5	-4	-3	-2	0	0	0	0	0	0	0	1	3	5
					0		0							
Prvek	o	i	b2	h	b2	h	b1	S	b1	š	b1	i	b2	o
h?	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
c?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i?	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
š?	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
S?	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
b2?	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
b1?	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
o?	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
R_T	50	15	3	2	3	2	3	4	3	4	3	15	3	50
$R_{T\ x+}$	50	15	3	2	3	2	3,5	3,5	3,5	3,5	3	15	3	50
$R_{T\ x-}$	50	15	3	2	3	2	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	15	3	50
$R_{T\ yz+}$	50	9	3	2	3	2	9	9,5	9	9,5	9	9	9	50
$R_{T\ yz-}$	50	32,5	9	2,5	3	2	9	9,5	9	9,5	9	9	2,5	50
$R_{T\ yz+}$	50	9	3	2	3	2	9	9,5	9	9,5	9	9	9	50
$R_{T\ yz-}$	50	9	3	2	3	2	9	9,5	9	9,5	9	9	9	50
ρ	1,28	1350	7870	5500	7870	5500	7870	2500	7870	2500	7870	1350	7870	1,28
c_T	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
T start	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tab.2: Příklad tabulky přiřazení vlastností

Sada logických (1 nebo 0) identifikátorů jako spouštěčů potenciální aktivity a vypočítají se vlastnosti všech jeho šesti rozhraní a definuje výchozí stav soustavy. Příklad přiřazení je uveden v Tab.1.

Svislými barevnými pruhy je pro přehlednost vyznačena geometrická příslušnost prvku (viz Tab.2), vodorovnými naopak skupinová příslušnost vlastností. Fialové řádky jsou logické identifikátory, sytě zelené materiálové vlastnosti a bledě zelené vlastnosti rozhraní. Vlastnosti rozhraní se určí rutinou podle vztahu (11a). Řádek T start představuje definici výchozího stavu, v tomto případě odvozenou od výchozí teploty okolí. V zásadě představuje situaci, kdy byly dlouhodobě vypnuty všechny aktivity při konstantní teplotě okolí $T_o = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

			krok	čas		
p h topidlo	p š štít	p S RTDS	0	0:00:00	To okolí	30
0	0	0	1	0:00:06	30	30
0	0	0	2	0:00:12	30	30
0	0	0	3	0:00:18	30	30
0	0	0	4	0:00:24	30	30
0	0	0	5	0:00:30	30	30
0	0	0	6	0:00:36	30	30
0	0	0	7	0:00:42	30	30
0	0	0	8	0:00:48	30	30
0	0	0	9	0:00:54	30	30
50	0	0	10	0:01:00	30	30
50	0	0	11	0:01:06	30	30
50	0	0	12	0:01:12	30	30
50	0	0	13	0:01:18	30	30
50	0	0	14	0:01:24	30	30
50	0	0	15	0:01:30	30	30
50	0	0	16	0:01:36	30	30
50	0	0	17	0:01:42	30	30
50	0	0	18	0:01:48	30	30
50	0	0	19	0:01:54	30	30
50	0	0	20	0:02:00	30	30
50	0	0	21	0:02:06	30	30
50	0	0	22	0:02:12	30	30
50	0	0	23	0:02:18	30	30
50	0	0	24	0:02:24	30	30
50	0	0	25	0:02:30	30	30

Tab.3: Příklad tabulky rozvoje aktivit vyjma prvků typu RTDS a okolí

		prvek č.	94	96	97	98	99	101	102
	souřadnice	x	0	2	3	4	5	7	8
	souřadnice	y,z	0	0	0	0	0	0	0
krok n	čas		Teploty prvků						
	h:mm:ss	T o okolí	[°C]						
0	0:00:00	[°C]	30	30	30	30	30	30	30
1	0:00:06	30,16	30	30	30,32	30	30,35	30	30,16
2	0:00:12	30,31	30	30,02	30,45	30,04	30,5	30	30,31
3	0:00:18	30,47	30	30,04	30,53	30,08	30,59	30	30,47
4	0:00:24	30,63	30	30,06	30,59	30,13	30,66	30,01	30,63
5	0:00:30	30,79	30	30,08	30,64	30,17	30,71	30,02	30,79
6	0:00:36	30,94	30	30,1	30,68	30,22	30,75	30,03	30,94
7	0:00:42	31,1	30	30,12	30,72	30,26	30,79	30,04	31,1
8	0:00:48	31,26	30	30,14	30,75	30,3	30,82	30,06	31,26
9	0:00:54	31,41	30,01	30,16	30,78	30,34	30,85	30,08	31,41
10	0:01:00	31,57	31,07	30,17	30,81	30,38	30,88	30,1	31,57
11	0:01:06	31,73	32,14	30,27	30,83	30,42	30,91	30,12	31,73
12	0:01:12	31,88	33,18	30,43	30,87	30,45	30,94	30,14	31,88
13	0:01:18	32,04	34,15	30,65	30,92	30,48	30,96	30,16	32,04
14	0:01:24	32,2	35,04	30,9	31	30,51	30,99	30,18	32,2
15	0:01:30	32,35	35,86	31,19	31,09	30,55	31,01	30,21	32,35
16	0:01:36	32,51	36,6	31,51	31,2	30,58	31,04	30,24	32,51
17	0:01:42	32,67	37,29	31,83	31,33	30,62	31,06	30,26	32,67
18	0:01:48	32,82	37,92	32,17	31,46	30,66	31,09	30,29	32,82
19	0:01:54	32,98	38,51	32,51	31,61	30,71	31,12	30,32	32,98
20	0:02:00	33,14	39,07	32,86	31,76	30,76	31,15	30,35	33,14
21	0:02:06	33,29	39,59	33,2	31,92	30,81	31,18	30,38	33,29
22	0:02:12	33,45	40,08	33,55	32,09	30,87	31,21	30,41	33,45
23	0:02:18	33,6	40,55	33,89	32,26	30,93	31,24	30,45	33,6

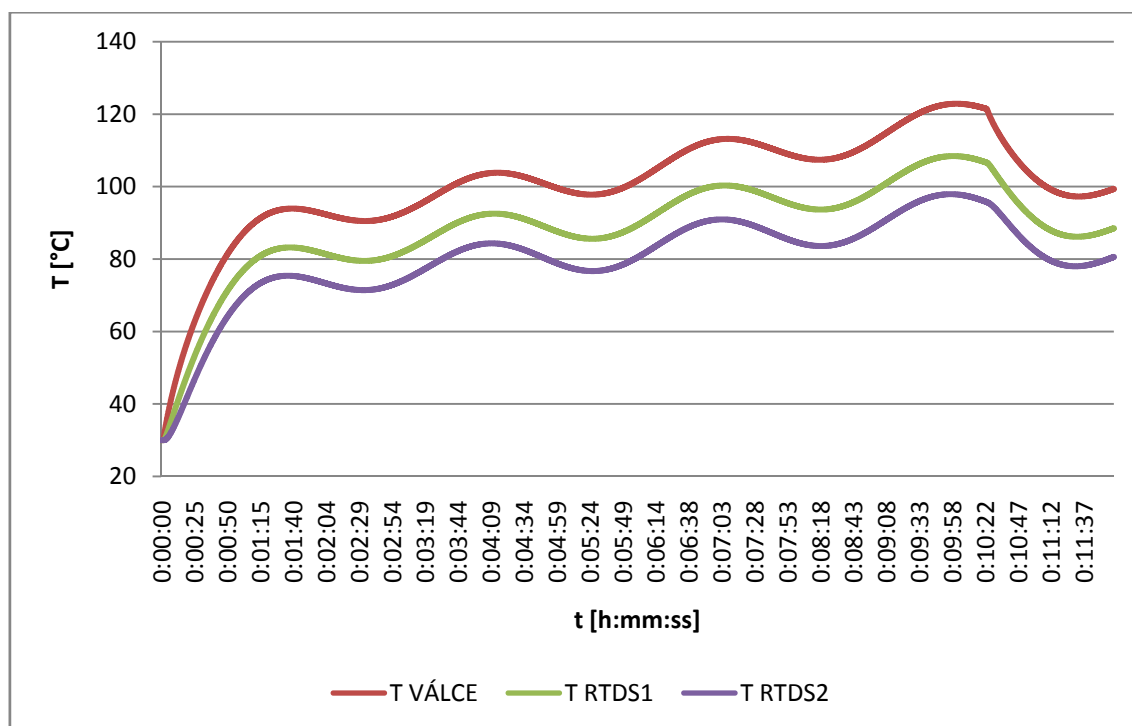
Tab.4: Příklad tabulky rozvoje teplot prvků vlivem aktivity soustavy vlastních prvků

Poté se vygeneruje sloupcová tabulka časového rozvoje aktivit prvků, jimž je taková možnost přiřazena. V našem případě jsou to prvky o, h, S a š. Přitom aktivity okolí (prvek o) a topidla (prvky h) jsou závislé pouze na představě o funkci a interakcích neregulované soustavy, naopak u prvků S a š jako prvků typu RTDS bude jejich aktivita určována z porovnání návrhově předepsané a skutečné teploty $T(x,y,z,n-1) = T(k,n-1)$ určené jim v předchozím simulačním kroku (n-1). Proto se testuje nejprve soustava s prvky typu RTDS bez funkce, tedy bez aktivity, a to při výchozí teplotě okolí, zjistí se její vlastní chování a

teprve po té se doplní rutina pro určení odezvy prvků typu RTDS na její aktuální stav, případně se doplní nezávislý rozvoj aktivity okolí formou jejího projevu ve změnách její teploty. Ukázkový příklad takového výchozího rozvoje aktivit je patrný z Tab.3.

Nyní již lze s využitím rozepsaného vztahu (12a) přistoupit ke generování rutiny rozvoje teplot každého z prvků soustavy. Příklad uspořádání je patrný z Tab.4.

Barevné zvýraznění sloupců opět ukazuje na příslušnost k vybrané skupině prvků . Pro názornost je vhodné u vybraných prvků (tedy vlastně sloupců) převést data do grafické podoby ve formě časového rozvoje teplot. Příklad je patrný z Obr. 6.



Obr.6: Příklad grafu rozvoje teplot prvků vlivem aktivity soustavy vlastních prvků

Dalším postupným krokem je doplnění rutiny vyjadřující aktivní reakci prvků typu RTDS na okamžitý stav teplot jim okolních prvků soustavy. V každém jednotlivém kroku ji lze určit s uvážením definovaných vlastností RTDS, tj. před dosažením jemu vlastní pracovní teploty je jeho aktivita (výkonově) dána maximálním disponibilním příkonem jeho zapojení ($p_{\max}$). Po jejím dosažení se v každém kroku jeho aktivita určí jedním z následujících způsobů:

a) Výkonově jako ideální RTDS

Ze vztahu (10) s uvažováním, že má-li RTDS setrvat na konstantní teplotě, musí pro něj být výkon určený k akumulaci nulový, tedy:

$$0 = \sum_k p(n, k_{+}) + p(n-1, k)$$

odkud aktivita RTDS

$$p(n, k) = - \sum_k p(n-1, k_{+})$$

Odtud se dá při znalosti pracovní teploty a zapojení rezistorů RTDS zpětně určit potřebné napájecí napětí. Pro zapojení podle Obr.3 by to například bylo $U(n, k) = (p(n, k) / R_c)^{1/2}$. Pro střední nastavení polohy jezdce potenciometru zřejmě má být také $R_T = Pt(T(n-1, k))$, odkud $U(n, k) = (p(n, k) / 2.R_t)^{1/2}$. V tomto tvaru $U_n \approx U(n, k) = (p(n, k) / 2.R_t)^{1/2}$ jej případně lze použít i pro oblast náběhu do funkce, tedy v době, kdy $p(n, k) = p_{\max}$ a tudíž $T(n, k) < T_v$.

b) Napětově jako reálný RTDS

V kroku (n) se z jeho aktuální teploty (krok n-1) v souladu se zapojením (např. podle Obr.3) určí aktuální hodnota odporů jeho rezistorů a přidělí se mu napětí ze zapojení následující rutinou:

Zjistí se napětí příslušné vstupu -In IOZ jako

$$U_{In-}(n) = U(n-1) \cdot \frac{Pt(T(n-1))}{Pt(T(n-1)) + R_T}$$

kde

$$Pt(T(n-1)) = Pt_0 \cdot (1 + TCR \cdot T(n-1))$$

určí se napětí na vstupu +In IOZ jako $U_{In+}(n) = U_n \cdot \frac{\alpha(n) \cdot P + R_R}{P + 2 \cdot R_R}$, kde proměnná $\alpha(n)$ ukazuje na aktuální úhel natočení potenciometru P a je $\alpha \in (0, 1)$.

Nyní lze určit aktuální rozdíl napětí na vstupech IOZ, přidělit mu libovolné konečné zesílení A, kde teoreticky $A \in (0, \infty)$, prakticky je vhodné $A \in (1, 100)$ a z podmínky:

Je-li:

$$A.(U_{in+}(n) - U_{in-}(n)) > U_n, \text{ pak } U(n) = U_n, \text{ jinak } U(n) = A(U_{in+}(n) - U_{in-}(n))$$

Určíme hodnotu napětí přidělitelnou prvku RTDS. Odtud již lze snadno danému RTDS určit jeho aktivitu jako: $p(n) = U^2(n) / R_c(n-1)$, kde $R_c(n-1) = R_T + Pt(T(n-1))$. Jelikož je zřejmé, že předchozím postupem je každá další proměnná s indexem (n) určena výhradně z již nově určených hodnot a proměnných indexovaných jako (n-1). To znamená, že aktivita v n-tém kroku vychází výhradně ze stavu soustavy v kroku (n-1) a nezávisle (aktuálně) nastavitelné pracovní teploty RTDS (polohou jezdce potenciometru), což svědčí o její využitelnosti.

Bude-li v soustavě instalováno více prvků RTDS, potom přejde indexování do tvaru $(n) \rightarrow (n, k)$, $(n-1) \rightarrow (n-1, k)$, kde k bude identifikátor jednotlivého RTDS. Jednotlivé RTDS mohou podle zapojení pracovat nezávisle, případně závisle ve vhodném společném zapojení. Pojem nezávisle zde představuje funkční nezávislost, termodynamicky budou přirozeně jejich účinky na soustavu současné, což znamená, že i funkčně nezávislé RTDS se budou skrze soustavu vzájemně ovlivňovat. V případě, že jejich zapojení budou nezávislá, budou i jejich funkce nezávislé. Naopak, budou-li současně využívat společného zapojení, budou i jejich funkce vzájemně závislé. Jednotlivé jejich výstupní signály budou z různých hledisek (podle umístění v soustavě a zapojení) monitorovat aktuální stav soustavy, tj. její chování v čase. V případě, že se okamžitou hodnotou užitečného signálu kteréhokoliv z nich ($U(n, k)$) začne řídit aktivita jinak soustavě vlastního aktivního prvku (například topidla) přejde celá soustava do zpětnovazebně regulovaného stavu. V takovém případě se RTDS stane autonomním regulátorem.

Tak dojde u tabulky Tab.3 k vyplnění sloupců platných pro jednotlivé RTDS instalované v soustavě jejich aktuálními aktivitami, tedy časový rozvoj užitečných signálů jednotlivých RTDS monitorujících stav simulované soustavy. Příklad je patrný z Tab.5.

Grafická reprezentace časového rozvoje aktivity všech aktivních prvků současně nám potom dává jasnou představu o signálových odezvách RTDS na aktivity vlastních aktivních prvků soustavy a zároveň představu o míře ovlivnění soustavy instalací jednotlivých prvků RTDS.

To je předmětem řešení konkrétnosti aplikace a bude přiblíženo v rámci následující kapitole této práce.

			krok	čas		
p h topidlo	p š štít	p S RTDS	0	0:00:00	To okolí	30
0	7,524	6,79	1	0:00:06	30,16	30,16
0	7,523	6,79	2	0:00:12	30,31	30,31
0	7,523	6,79	3	0:00:18	30,47	30,47
0	7,523	6,79	4	0:00:24	30,63	30,63
0	7,523	6,79	5	0:00:30	30,79	30,79
0	7,522	6,79	6	0:00:36	30,94	30,94
0	7,522	6,79	7	0:00:42	31,1	31,1
0	7,522	6,79	8	0:00:48	31,26	31,26
0	7,522	6,79	9	0:00:54	31,41	31,41
50	7,522	6,79	10	0:01:00	31,57	31,57
50	7,522	6,79	11	0:01:06	31,73	31,73
50	7,522	6,79	12	0:01:12	31,88	31,88
50	7,522	6,79	13	0:01:18	32,04	32,04
50	7,522	6,79	14	0:01:24	32,2	32,2
50	7,522	6,79	15	0:01:30	32,35	32,35
50	7,523	6,789	16	0:01:36	32,51	32,51
50	7,523	6,789	17	0:01:42	32,67	32,67
50	7,523	6,788	18	0:01:48	32,82	32,82
50	7,524	6,788	19	0:01:54	32,98	32,98
50	7,524	6,787	20	0:02:00	33,14	33,14
50	7,525	6,787	21	0:02:06	33,29	33,29
50	7,525	6,786	22	0:02:12	33,45	33,45
50	7,526	6,785	23	0:02:18	33,6	33,6
50	7,527	6,785	24	0:02:24	33,76	33,76
50	7,527	6,784	25	0:02:30	33,92	33,92

Tab.5: Příklad tabulky rozvoje aktivit včetně prvků typu RTDS a okolí

Při návrhu topologie RTDS vycházíme z toho, že funkce reálného RTDS se má svými vlastnostmi co nejvíce přibližovat ideálnímu RTDS. Je to především:

- podmínka setrvání na konstantní teplotě při proměnné interakci s vlastním okolím soustavy

- schopnost bezprostředně a za všech okolností přenést (výkonově) vlastní aktivitu do vlastního okolí soustavy

Míru s jakou se vlastnosti reálného senzoru mohou ideálnímu přiblížit, posoudíme porovnáním simulované odezvy se skutečnou odezvou realizovaného vzorku.

Termodynamický senzor ve vybrané aplikaci

Některé aplikace RTDS jako monitorovací prvky určitých termodynamických soustav byly publikovány v [4]. V takových aplikacích se používají výkonové verze RTDS tak, aby ve svém výkonovém rozpětí dokázali kompenzovat veškeré interakce s okolní soustavou. Jejich ověřování pak probíhá formou funkčních testů ve fyzické soustavě, která vždy musí obsahovat alespoň jeden vlastní aktivní prvek, musí tudíž být provozována. Proto by návrh podobné aplikace jednak nepřinesl v zásadě nic podstatně nového a navíc by ověřování muselo být organizováno u uživatele soustavy, což není v rámci zpracování diplomové práce nejvhodnější. Proto jsem se rozhodl pro výběr takové aplikace, která dosud nebyla řešena ani publikována a současně takové, kterou je možné snadno ověřit v podmínkách školní laboratoře. Takový výběr splňuje jednak požadavek novosti, užitečnost a přínosnost odvedené práce a vysokou pravděpodobnost praktické realizovatelnosti a konečného ověření.

Rozhodl jsem se tedy hledat aplikaci v oblasti regulátorů a signalizátorů. V první z nich jsem se pokusil navrhnout ekvitermní regulátor teploty běžného paketového topného tělesa. Za cíl jsem si stanovil jeho regulaci tak, aby teplota vybraného místa jeho povrchu setrvala na předem stanovené konstantní teplotě nezávisle na změnách teploty okolí a ostatních vlivech. Cílově by takové těleso mohlo sloužit jako ekvitermní zdroj energie s dostatečnou výkonovou rezervou.

Posléze se mě naskytla příležitost pracovat na zákaznické aplikaci, spočívající na včasné signalizaci zvýšeného opotřebení válce pístového čerpadla. Zvýšené opotřebení se projevuje zvýšením tření pístu a stěny válce, čímž dochází k nárustu teploty a dalšímu rychlému opotřebovávání. Doposud se takový stav idikoval pomocí termočláňkového teploměru umístěného do stěny válce a na překročení stupně opotřebení se usuzovalo z překročení stanovené mezní teploty ve vybraném místě. Vybraným místem je stěna válce v blízkosti dolní úvrati, kde již není stěna přímo chlazena čerpanou kapalinou, tedy místo které se nejrychleji opotřebovává a na jehož teplotě se zvýšení tření nejvíce projevuje. Přesto je tento

dosud používaný způsob z uživateli neznámých důvodů často nespolehlivý. Často se stává, že v okamžiku signalizace překročení stanovené mezní teploty opotřebení pístu a válce pokročilo už natolik, že běžnou opravou je již neodstranitelné. Snížení signalizační teploty naopak často vede k odstavení a demontáži čerpadel, u nichž se posléze zjistí, že fyzické opotřebení ještě opravu nevyžadovalo.

Jednoduchý RTDS jako regulátor paketového topného tělesa

Na ekvitermní regulátory jsou obecně kladeny následující požadavky:

- a) co nejrychlejší náběh na zadanou pracovní teplotu
- b) co nejpresnější setrvání na vlastní pracovní teplotě
- c) rychlá reakce na změny okolního prostředí a přítomnost nových objektů v jeho bezprostřední blízkosti (např. vsázka)
- d) dostatečná výkonová rezerva pokrývající výše uvedené vlivy v plném rozsahu

Základní realizační představa je založena na aplikaci kontaktního RTDS instalovaného přímo na vybraném místě paketového topného tělesa v blízkosti jeho geometrického středu tak, aby jeho tepelná vazba s vlastní topnou spirálou skrzestěnu paketu byla co nejtěsnější. Pracovní teplota nízkovýkonového RTDS bude zvolena shodná nebo blízká požadované teplotě tělesa. Vlastní RTDS bude mít při vypnutém síťovém napájení topné spirály tělesa snahu ohřát se vlastní aktivitou na pracovní teplotu, tedy vlastně i zadanou teplotu paketu. V nízkovýkonové verzi se mu to ani při plném disponibilním napětí $U_N = 24V$ nepodaří a dokud nedojde k připojení síťového napájení spirály topidla na něm zřejmě setrvá. Použijeme-li napájecí napětí RTDS jako řídicí signál pro spínání opticky odděleného síťového bezkontaktního relé zapojeného v síťové části obvodu, bude celý systém čekat jen na připojení k síti 230V, 50Hz.

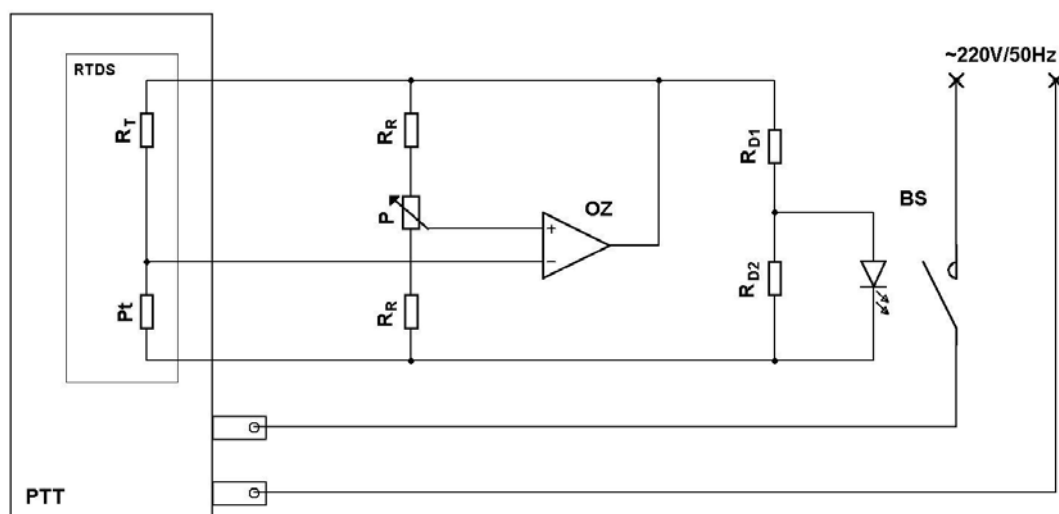
Po připojení k síti umožní signálem RTDS sepnutý bezkontaktní spínač průchod proudu a spirála paketu bude topit plným výkonem a teplo se bude šířit do stěn paketu a také ke kontaktně instalovanému RTDS a jeho povrchu. To vše do okamžiku kdy teplota RTDS dosáhne, případně mírně překročí zadanou pracovní teplotu. V takovém případě dojde k velmi prudkému poklesu signálu RTDS na malou, případně až nulovou úroveň. To je důvod k rozepnutí bezkontaktního spínače a přerušení dodávky výkonu do topné spirály, která začne chladnout. To se s mírným spožděním přeneso na RTDS. Jakmile jeho teplota klesne i jen

málo pod zadanou pracovní teplotu, pokusí se sám sebe přihrát a rychlému nárustu jeho užitečného signálu zpět na 24V a opětnému sepnutí bezkontaktního spínače. Tento děj se bude neustále opakovat v rychlém sledu za sebou.

Bude-li použit typ bezkontaktního spínače spínaný v nule, dá se očekávat, že opakování bude probíhat podle velikosti výkonu sdíleného paketu s okolím tak, že doba sepnutí může být obecně n -násobkem půlperiody síťové frekvence a doba rozepnutí zase m -násobkem téhož. Při dostatečné citlivosti RTDS se bude počet sepnutých či rozepnutých půlperiod měnit podle potřeby s citlivostí na jedinou z nich (jednu půlperiodu). Toto odpovídá jenomu procentu maximálního výkonu topné spirály paketu.

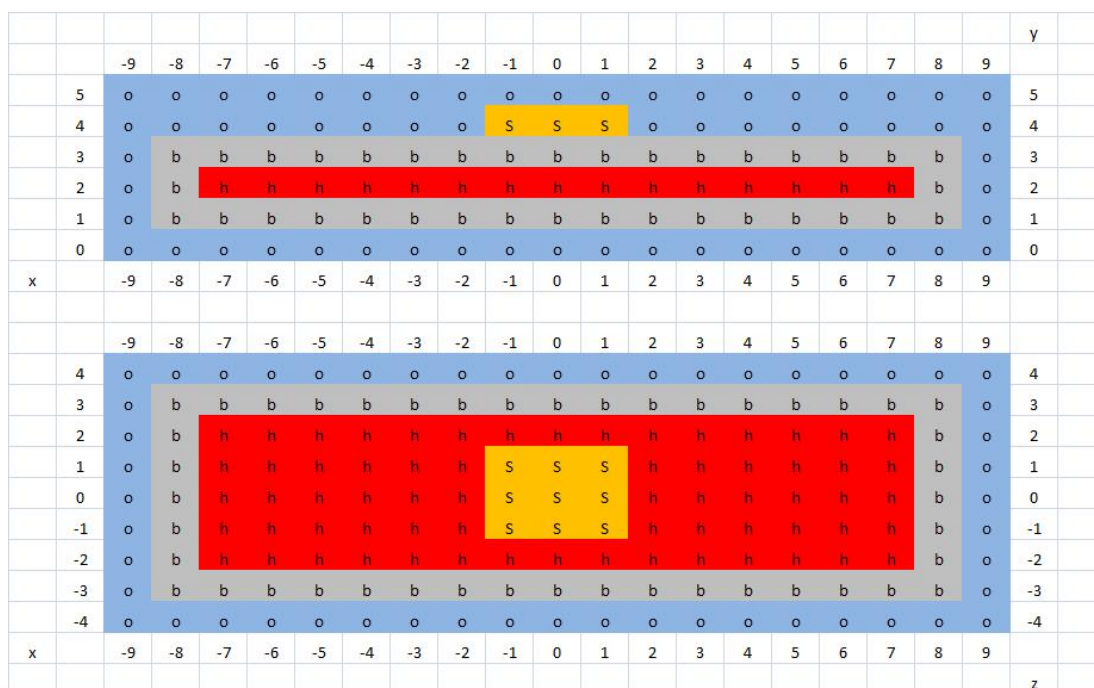
Takto bude RTDS regulátor pracovat pokud spoždění přenosu aktivity spirály na RTDS nepřekročí dobu trvání jedné půlperiody síťové frekvence. Bude-li tomu naopak, prodlouží se doba reakce na celistvý násobek počtu půlperiod právě překračující skutečné spoždění přenosu změn aktivity topné spirály na RTDS. Takový stav povede ke zvyšování rozkmitu teploty topné spirály a jako důsledek také k nárustu amplitudy překmitu regulované veličiny, tedy teploty paketu. Proto je žádoucí, aby tepelná vazba mezi RTDS a spirálou byla co nejtěsnější. Vzájemný tepelný odpor tedy musí být co nejmenší. Celé zapojení by fungovalo i s méně dokonalou tepelnou vazbou, avšak pouze za cenu zvýšeného rozkmitu regulované veličiny kolem zadané hodnoty. Grafické znázornění představy je patrné z Obr.7.

Tuto představu převedeme do simulačního modelu, v němž se pokusíme rutinně ověřit její šanci na splnění podmínek zadání. Započteme-li okolí, bude se jednat o šestivrstvý model v plošném uspořádání. Dolní vrstva bude obsahovat samé prvky okolí, další potom vrstvu těla paketu orámovanou obdelníkem složeným z prvků okolí, třetí vrstva může být s určitým zjednodušením reprezentována kompaktní vrstvou topidel orámovanou obdelníkem prvků těla paketu a obdelníkem prvků okolí. Čtvrtá vrstva bude shodná s druhou vrstvou, pátá bude představovat do malého obdelníku uspořádané prvky RTDS doplněná do plného rozsahu prvky okolí. Poslední šestá bude shodná s první tj. tvořena samými prvky okolí.



Obr.7: Základní představa o RTDS jako regulátoru jednoduchého paketového topidla

Uspořádání může být osově souměrné podél osy kolmé na střední prvek RTDS. Pro jednoduchost to lze znázornit v podobě dvou na sebe kolmých řezů podle Obr.8.

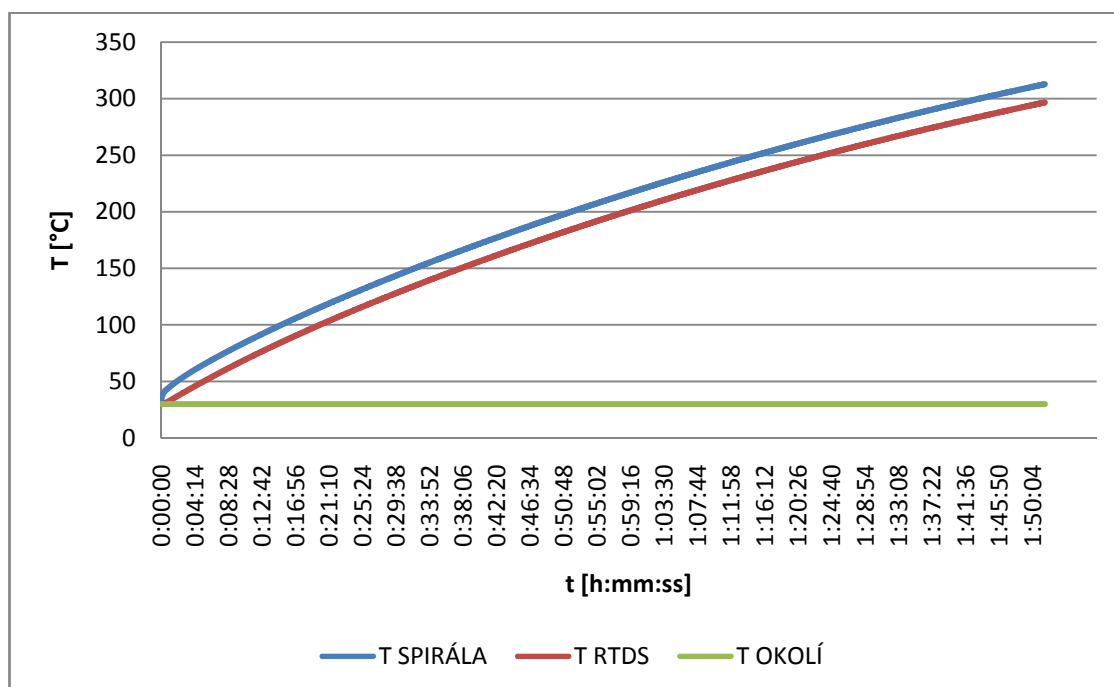


Obr.8: Geometrická reprezentace zjednodušeného modelu soustavy paketového topidla s RTDS

Prvek	Druh	Materiál	R_T	ρ	c_T
--	--	--	[K.m/W]	[kg/m ³]	[W/K.kg]
h	topidlo	keramika	0,0047	2470	448
S	TDS	keramika	0,0047	2470	448
b	Tělo	Fe	0,0117	7870	450
o	Okolí	vzduch	4,9781	1,276	206

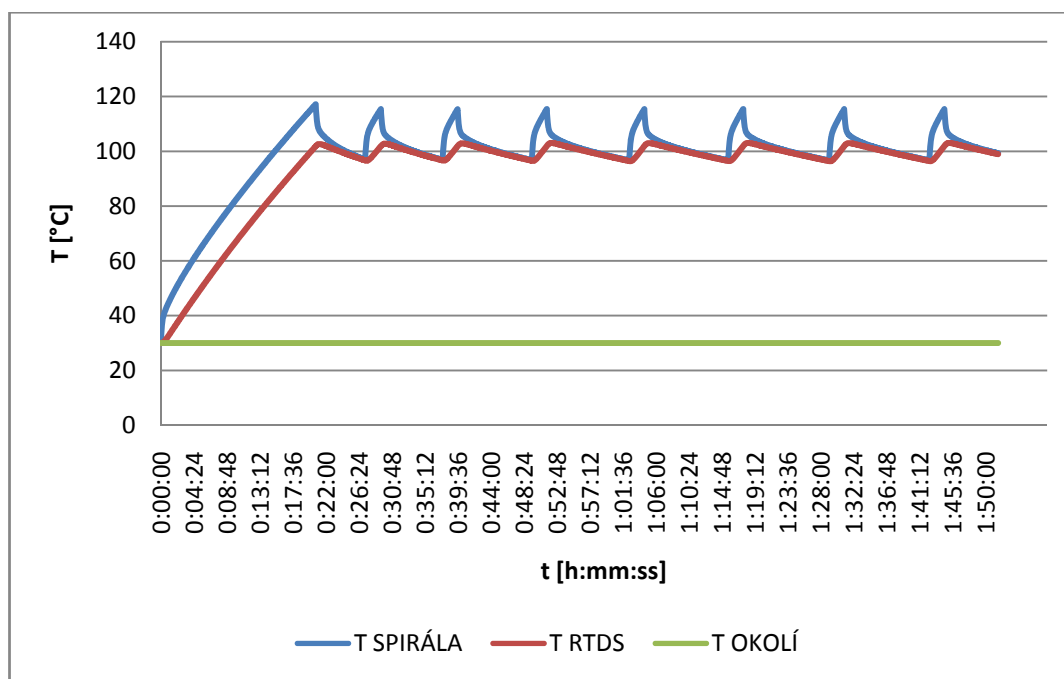
Tab.6: Tabulka vlastostí příslušná geometrické reprezentaci modelu topidla

Každému prvku přísluší řádková matice vlastností podle Tab.6. Přestože předpokládám, že vlastní topidlo uvnitř kazety je pravděpodobně vinuté z kantalového drátu zalitého keramickou výplní, je v modelu zastupováno kompaktním aktivním prvkem, jehož termodynamické vlastnosti se budou více blížit keramice. Nyní lze podle postupu v kapitole Popis funkce modelu přistoupit ke generování mapy vlastností prvků, sloupcové tabulky časového rozvoje aktivit a rutiny rozvoje teplot každého z prvků soustavy. Základní funkci modelu ověříme tiskem grafu rozvoje teplot prvků vlivem aktivity soustavě vlastních prvků, viz. Obr.9.



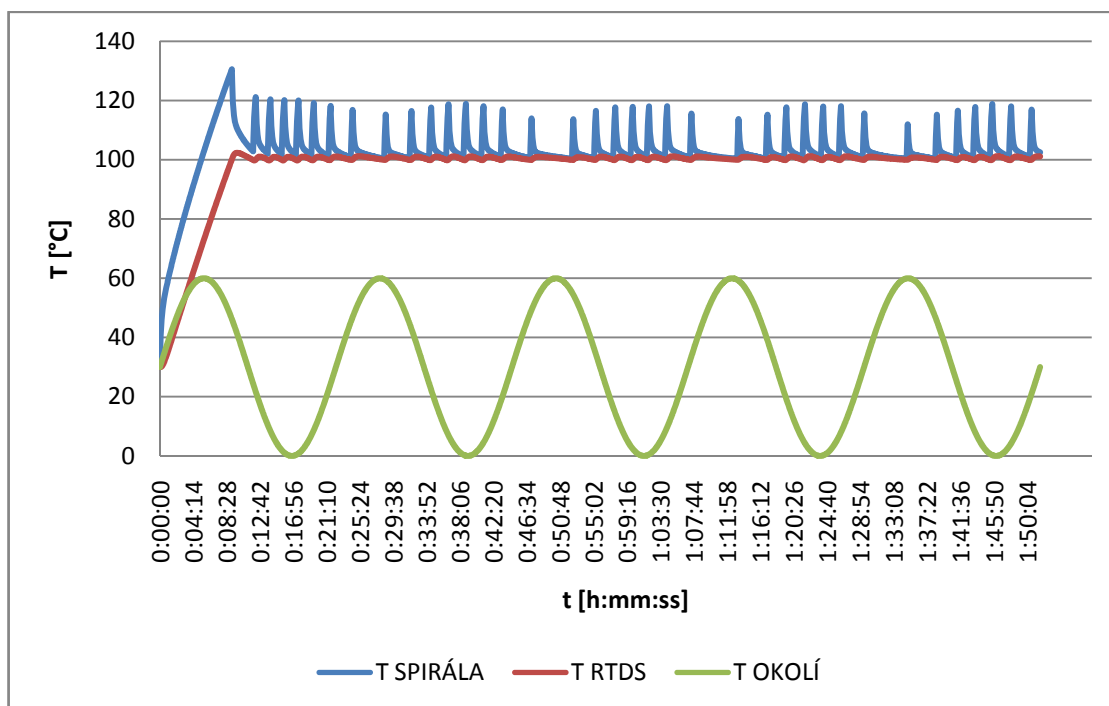
Obr.9: Rozvoj teplot prvků soustavy bez RTDS

Následně zvolíme způsob generování odezvy RTDS na reálné chování soustavy a spustíme rutinu ovládání bezkontaktního spínače signálem RTDS. Funkci rutiny ověříme tiskem rozvoje teplot prvků soustavy s uplatněním vlivu signálu RTDS viz. Obr.10.



Obr.10: Rozvoj teplot prvků pomocí RTDS regulované soustavy včetně jeho vlivu

Nyní je možné do modelu doplňovat rutiny umožňující postihnout cizí vlivy. V našem případě vliv nezávislých změn teploty okolí. S vědomím toho, že blízký předpokládané skutečnosti by mohl být sinusový průběh odchylky od průměrné teploty s periodou jeden den jsem pro ověřování takový průběh rozvoje zvolil s tím, že lze snadno měnit amplitudu odchylky a také periodu průběhu. To se nakonec ukázalo užitečným neboť změnou periody lze snadno přejít na analýzu odezvy na rychlé změny teploty. Příklad rozvoje teplot vybraných prvků regulované soustavy na změny teploty okolí je uveden na Obr. 11.



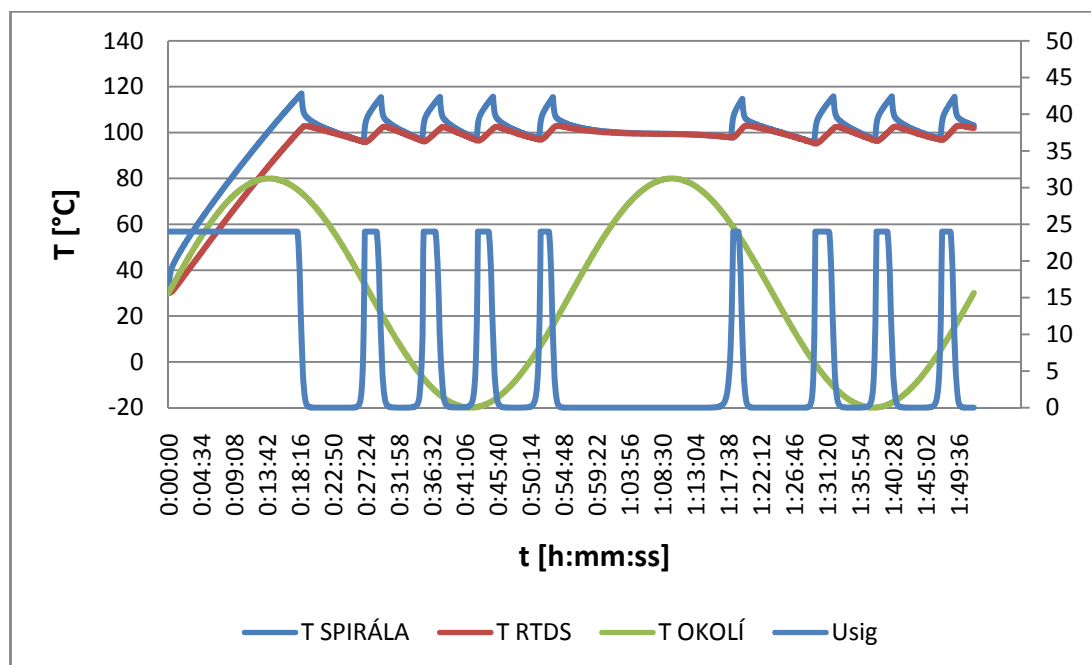
Obr.11: Rozvoj teplot prvků pomocí RTDS regulované soustavy včetně vlivu okolí

Jelikož je RTDS vysokoohmový, v simulované soustavě se prakticky vlastním výkonem nepřihřívá a průběh jeho teploty na Obr.11 odpovídá průběhu teploty povrchu paketu a představuje tudíž současně regulovanou veličinu. Průběh signálu RTDS jako veličiny ovládající spínání bezkontaktního relé je vidět na Obr.12.

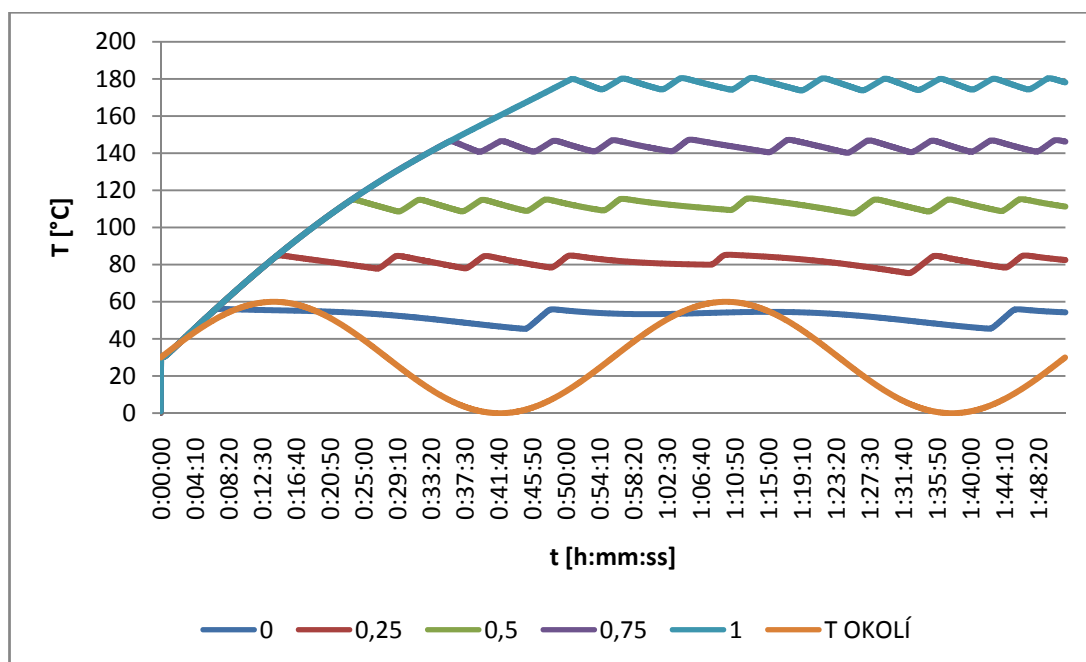
Je vidět, že RTDS řídí spínání výkonu topné spirály paketového topidla odvisle od skutečné teploty povrchu paketu nezávisle na tom, kterou z aktivit je aktuálně ovlivněna. Je patrné, že RTDS v této aplikaci plně nahrazuje klasický kanál snímání a komparace teploty včetně řídicího obvodu výkonového prvku. Zdá se, že uplatněním RTDS se problematika regulace ve spínacím režimu oproti klasickým řešením značně zjednoduší. Je zřejmé, že pracuje jako optimálně přizpůsobený limitní regulátor, přičemž o přizpůsobení se vlastně postará sama regulovaná soustava svými přirozenými vlastnostmi. Zpoždění a rozkmit regulované veličiny kolem žádané hodnoty je dán výhradně časovou konstantou přenosu tepla od výkonného prvku (topné spirály) k RTDS jako v reálné soustavě už daných vlastností.

Možnost nastavení pracovní teploty paketu podle potřeby uživatele prostou změnou polohy jezdce potenciometru P dokladuje Obr.13. RTDS tak může pracovat jak jako zcela nezávislý autonomní regulátor, tak jako regulátor se signalizací stavu regulované veličiny na

dálku, tak i jako autonomní regulátor s možností dálkového ovládání pomocí průměrného děliče napětí řízeného proudem (např. 4-20 mA).



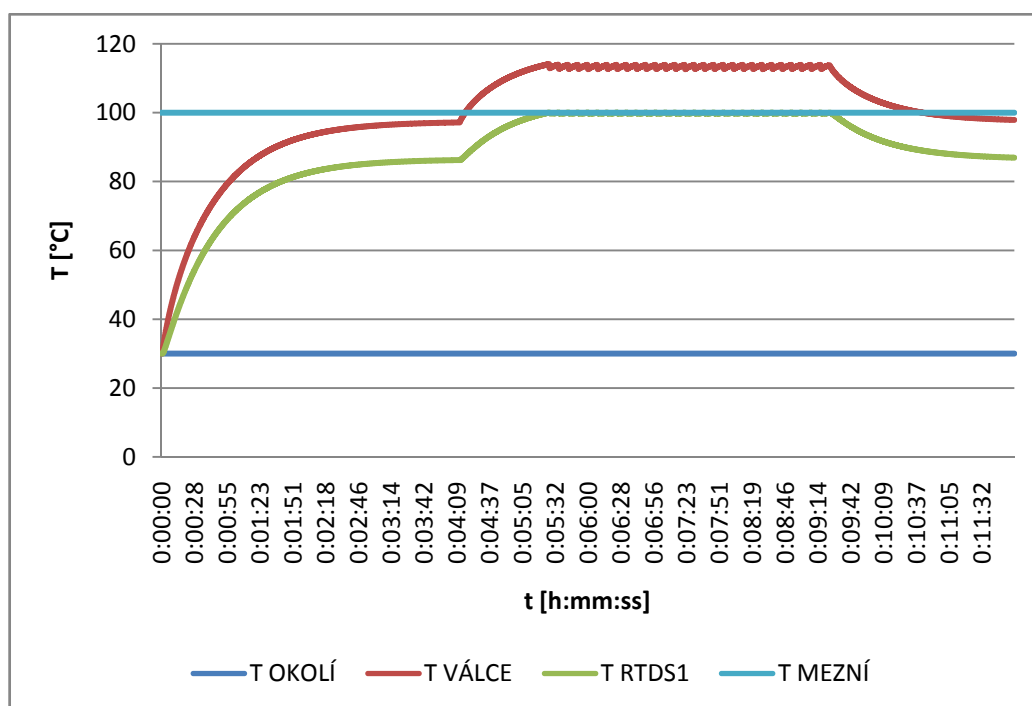
Obr.12: Napěťová odezva RTDS na souhrnnou aktivitu prvků regulované soustavy



Obr.13: Nastavení teploty paketu pestavením polohy a jezdce potenciometru P

RTDS signalizátor opotřebení válce pístového čerpadla

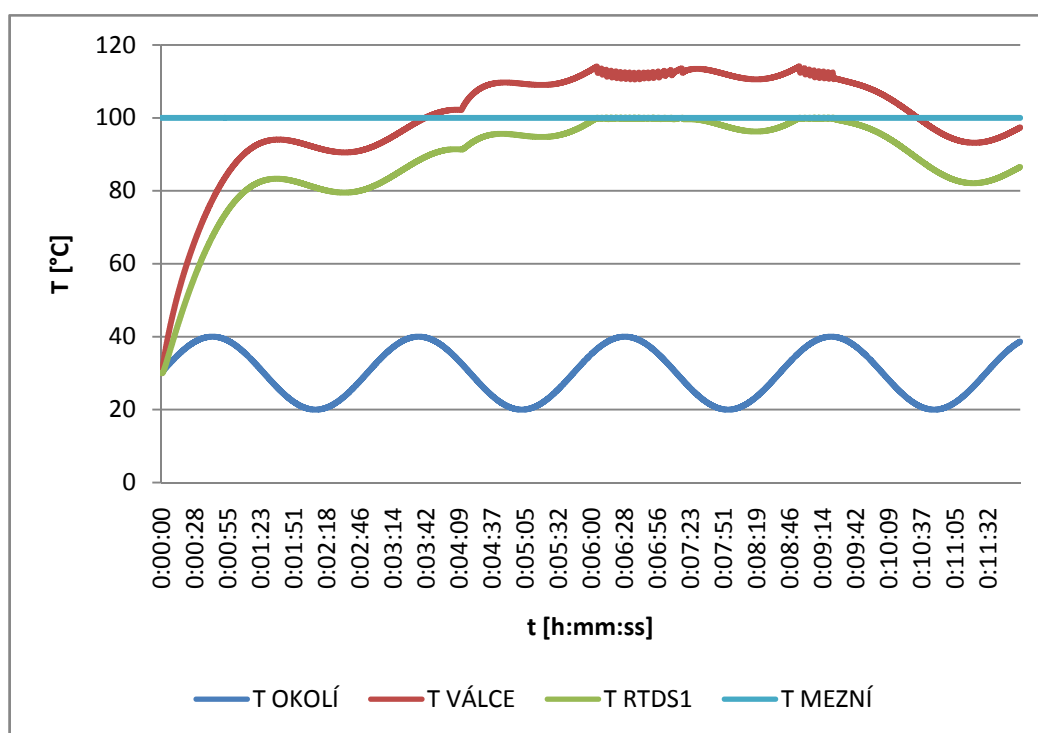
Za účelem posouzení, zda by aplikace RTDS mohla přispět ke zvýšení účinnosti signalizace vzniku ztrát třením opotřebeného pístu či stěn válce jsem vytvořil zjednodušený zástupný model viz. Obr.5, v němž je zdroj tření nahrazen aktivitou topidla s proměnným výkonem. Obdobně jako v předchozím případě jsem postupoval od vytvoření geometrické představy mapy vlastností prvků, rutin rozvoje aktivit a rutin stanovení rozvoje teplot všech prvků soustavy. Po té jsem se snažil modelově prostě nahradit termočlánekový teploměr umístovaný do bezprostřední blízkosti zdroje tření, v modelu tedy zástupného topidla. Po vytvoření modelu a zjištění rozvoje teplot prvků výhradně aktivitou vlastních prvků soustavy jsem provedl pokus o vypínání zástupného topidla od limitu teploty místa instalace teploměru. Tím jsem prakticky modelově ověřil funkční způsobilost stávajícího řešení. Zdálo se, že za stálých provozních podmínek není důvodu, aby nesplňovalo požadovanou funkci. Proto jsem model obdobně jako v případě modelu regulátoru doplnil o simulaci vlivu změn teploty okolí. Opět jsem zvolil zástupný sinusový průběh. Časový rozvoj teplot vybraných prvků v závislosti na simulovaném přírůstku tření v kombinaci bez upatnění vlivů změn teploty okolí je vidět na Obr.13.



Obr.13: Časový rozvoj teplot vybraných prvků soustavy reprezentující stěnu válce se simulovaným limitním omezováním od teploty klasického snímače bez vlivu okolí

Časový rozvoj ukazuje na náběh teploty po zapnutí čerpadla na normální pracovní stav. Zvýšení úrovně teploty válce v čase 0:04:15 již reprezentuje teplotní projevy náhlého zhoršení stavu válce a pístu simulovaného nárůstem aktivity zástupného prvku o 30%. Po dosažení limitní úrovně hodnoty teploty teploměru nastavené na 100°C, začne teplotní spínač v pravidelných intervalech čerpadlo vypínat, čímž je zamezeno zničení čerpadla.

Časový rozvoj teplot vybraných prvků v závislosti na simulovaném přírůstku tření v kombinaci s upatněním vlivů změn teploty okolí je vidět na Obr.14.



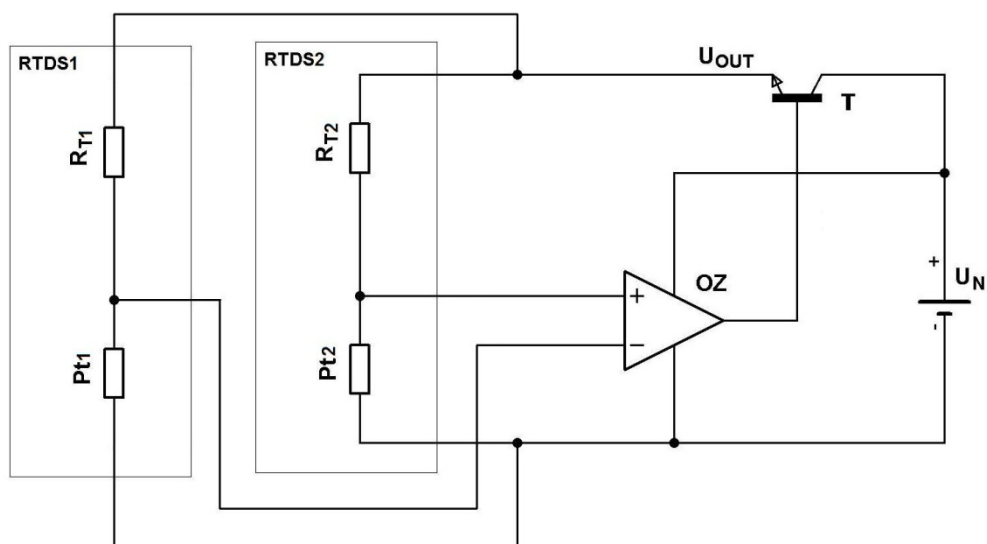
Obr.14: Časový rozvoj teplot vybraných prvků soustavy reprezentující stěnu válce se simulovaným limitním omezováním od teploty klasického snímače s vlivem okolí

Simulované průběhy předpokládají ideální stav stávajícího řešení s využitím ideálního teplotního spínače bez hystereze a chyb snímače teploty. V praxi musí být limit nastaven s dostatečnou rezervou vylučující chyby snímání teploty a určitou hysterezi vylučující nestabilitu teplotního spínače.

Je zřejmé, že stávající řešení při těsně nastaveném limitu tepoty správně funguje jen v oblasti maximálních přípustných teplot okolí. Naopak při nízkých teplotách okolí přesahuje tento vliv změny aktivity zvýšeným třením a tudíž nedojde k včasné signalizaci jeho nárustu. Je zřejmé, že doposud používané řešení při optimálním nastavení limitu správně funguje jen při vysokých teplotách okolí, naopak snaha o nápravu snížením limitu naopak posléze vede k falešné signalizaci při zvýšení okolní teploty, což odpovídá výskytu problémů popisovaných zadavatelem.

Je také zřejmé, že problém nespočívá ani v citlivosti ani správnosti nastavení limitu a prostou náhradou RTDS v obdobné funkci tedy nebude řešitelný. Je nutné zvolit uspořádání reagující nikoliv na změnu teploty, ale naopak na změny tepelného toku. Jelikož je vidět, že pracovní teplota stěny válce dynamicky prakticky kopíruje také změny teploty okolí je zřejmé, že tepelný tok se bude měnit přednostně v rytmu změn aktivity na třecích plochách, je tedy zřejmě věrohodnějším nositelem informace o opotřebení než jeho aktuální teplota.

K monitorování tepelného toku se dá využít RTDS druhého druhu, jinak definovatelný také jako vázaná dvojice RTDS vzájemě si definujících pracovní teplotu. Princip představy o funkci je patrný ze schématického obrázku termodynamického uspořádání a zapojení. Podle Obr.15.



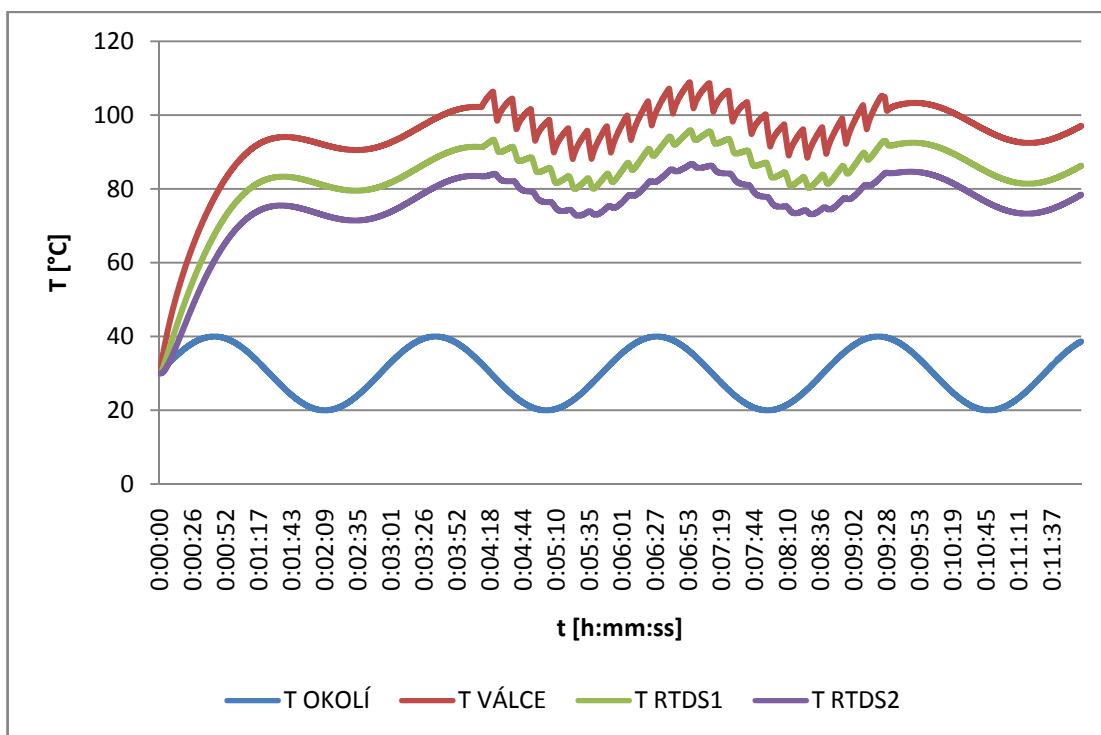
Obr.15: Uspořádání a zapojení pro monitorování změn tepelného toku

V podstatě to znamená, že RTDS2 se snaží definovat pracovní teplotu RTDS1 a výstupní napětí operačního zesilovače, které je společným napájecím napětím obou senzorů se snaží upravit teplotu obou z nich tak, aby tepelný tok od RTDS1 k RTDS2 zůstal konstantní. Celkový odpor obou RTDS není shodný, takže jeden z nich se ohřívá společným napětím více a druhý méně. Až do té doby, kdy jejich vzájemný rozdíl teplot vyvolá předem definovatelný tepelný tok od RTDS2 k RTDS1. Ve vysokoohmové verzi se potom bude snažit přehřívát dvojici v případě, že tepelný tok v soustavě s jinou vlastní aktivitou nebude dosahovat předdefinované hodnoty a naopak se bude snažit odtopit v situaci, kdy tepelný tok v soustavě tuto hodnotu překročí. Takto vyvolaná prudká změna výstupního signálu OZ poslouží jako citlivý signalizátor navýšení aktivity vlastního prvku soustavy oproti běžnému funkčnímu zatížení.

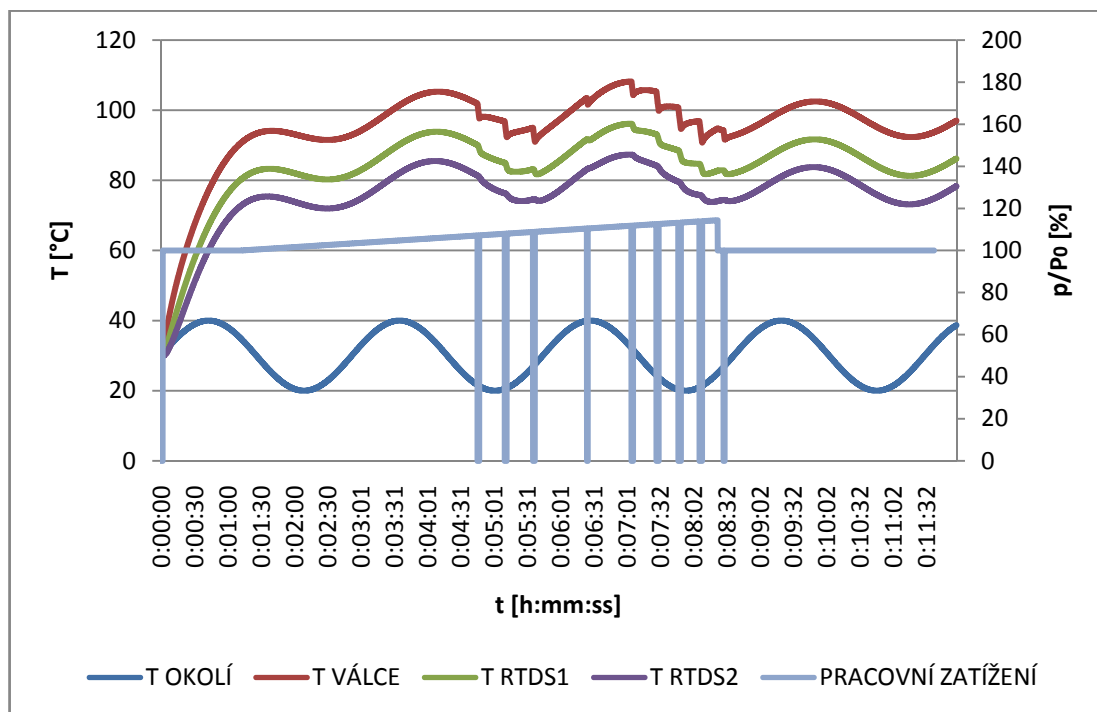
Nastaví-li se po zástavbě na pístové čerpadlo podmínky odpovídající tepelnému spádu neopotřebovaného pístu a válce, povede zvýšené opotřebení k nárustu tepelného toku prakticky nezávisle od teploty okolí (dobře chlazená soustava), který vyvolá prudký pokles užitečného signálu dvojice RTDS relativně nezávisle od aktuální teploty okolí.

Za účelem ověření výše definované soustavy jsem patřičně upravil modul rozvoje aktivit prvků soustavy a hledal podmínky nastvení pro správnou funkci. Aby mohla být simulovaná funkce dvojice RTDS věrohodně ověřena, byl obdobně jako v případě teploměru (dosavadní stav) simulován proces odstavování čerpadla odvisle od úrovně výstupního napětí OZ jako užitečného signálu. Výsledkem je simulací ověřený rozvoj teplot vybraných prvků soustavy podle Obr.16.

Z průběhu je patrné, že základní funkce navrženého zapojení vykazuje funkci podle výchozího předpokladu. Navržené řešení omezuje funkci čerpadla v oblasti horních i dolních teplot okolí výhradně v závislosti na nárustu tření stěn pístu a válce. Změnou amplitudy rozkmitu zástupné teploty okolí jsem ověřil necitlivost zapojení na tento vliv v širokém rozsahu, necitlivost na vliv rychlosti změn teploty okolí potom změnou nastavení periody průběhu a naopak požadovanou citlivost na nárust tření (zástupné aktivity) změnou poměru navýšení základní úrovně pracovního zatížení.



Obr.16: Rozvoj teplot prvků soustavy s uplatněním dvojice RTDS



Obr.17: Rozvoj teplot v závislosti na postupném nárůstu opotřebení pístu a válce

Nakonec jsem simuloval situaci nejvíce se blížíící skutečnému provozu, tj. pomalý postupný nárůst aktivity tření zástupného prvku tak, aby se dalo prokázat, že zapojení bude dostatečně citlivé na pomalu narůstající opotřebení běžnou pracovní aktivitou. Výsledek dokladuje Obr.17.

Parametry zapojení se dají nastavit tak, že by mělo na rozdíl od stávajícího řešení spolehlivě indikovat již 10% nárůst tření pracovních ploch. U stávajícího řešení nebylo možné nastavit menší citlivost než cca 30% a ani tak nepracovalo spolehlivě, jak již bylo uvedeno.

Jediným simulací zjištěným potenciálním nedostatkem je poměrně značná citlivost zapojení na předpokládané nastavovací prvky.

Realizace vzorků

Pro potvrzení simulací ověřených návrhů řešení bylo třeba realizovat výrobu funkčních ověřovacích vzorků. To fyzicky představuje jednak jednoduchý RTDS senzor, zdvojený RTDS senzor a několik kusů termodynamického zapojení. Mimo to bylo potřeba vybudovat a vybavit zkušební pracoviště vybavené měřicí technikou s možností ukládání naměřených dat do PC.

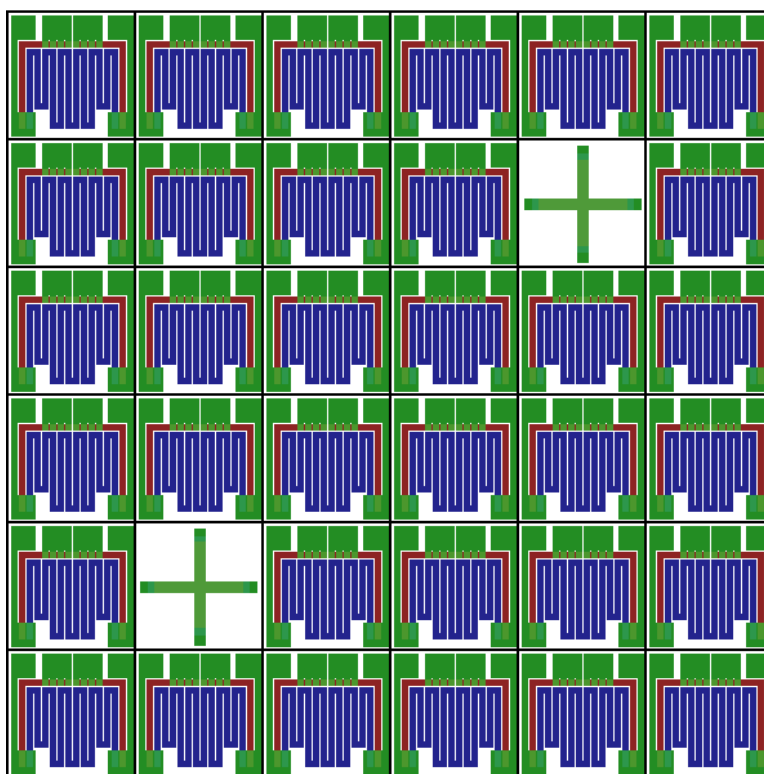
Jednoduchý RTDS jako regulátor teploty

Vzhledem k potenciálnímu zatížení RTDS a nutnosti dobré tepelné vazby mezi topnými a snímacími rezistory RTDS, stejně jako s ostatní soustavou, jsem se rozhodnul pro tlusovrstvou technologii. Odtud fáze technologické přípravy výroby obsahující:

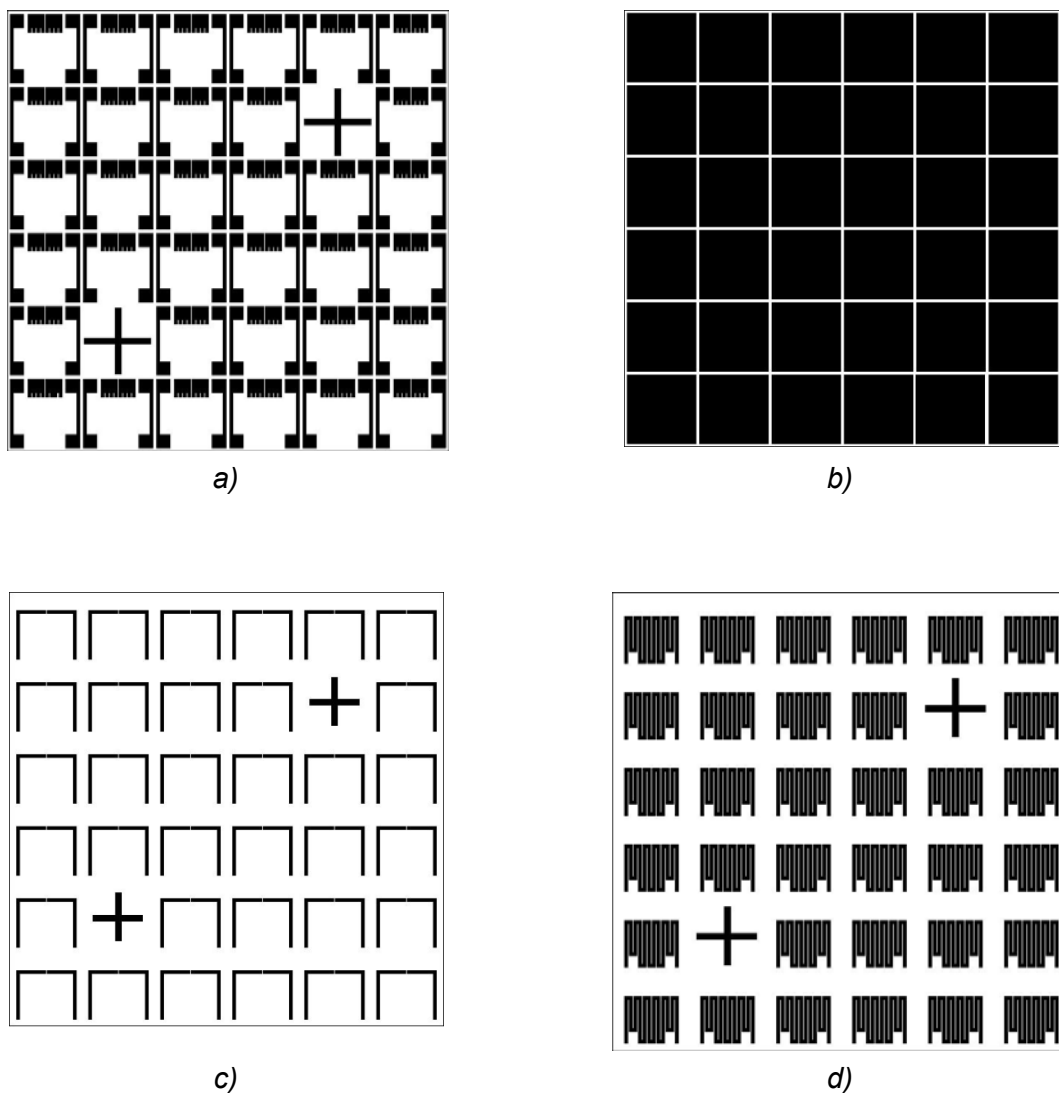
- a) návrh a výroba masek (multimotiv)
- b) návrh a výroba sít
- c) podklady pro rýhování keramiky (zajištění dělitelnosti na jednotlivé motivy)
- d) zajištění materiálu
- e) návrh jednotlivých realizačních kroků (technologický postup)
- f) vlastní výroba vzorků
- g) základní ověřovací měření
- h) funkční měření
- i) návrhy na opatření odstraňující zjištěné nedostatky

Návrh masek spočívá v rozvržení topologie jednotlivých funkčních částí senzoru na co nejmenší plochu nosného keramického substrátu. Substrátem zde je tlustovrstvový Al_2O_3 z produkce firmy ELCERAM a.s., Hradec Králové. Standardně se vyrábí v rozměru 4"x4". Tlustovrstvá technologie, která je na Ústavu mikroelektroniky k dispozici umožňuje tisk na substráty 2"x2". Dělení substrátu musí být tedy navrženo tak, že násobky rozměrů jednotlivého substrátu tvoří rozměr 2"x2", který se potom na výrobním rozměru 4x opakuje.

Aby zástavba do soustavy v cílové aplikaci byla jednoduchá, snažil jsem se RTDS navrhnut co nejmenší. Podle kapitoly *Jednoduchý RTDS jako regulátor paketového topného tělesa* se má jednat o vysokoohmovou strukturu, přitom jsem ale byl omezen nízkým odporem na čtverec pasty pro tisk teplotně závislého platinového odporu. Proto jsem rozšířil funkční strukturu podle Obr. 3 o jeden rezistor navíc vložený mezi Pt rezistor a mínus pól baterie. Tak se zajistí, aby výstupní napětí pro -IN vstup OZ představovalo zhruba $\frac{1}{2} U_{\text{OUT}}$ i při nízké realizovatelné hodnotě odporu Pt. Takový zásah sice poněkud snižuje vlastní teplotní citlivost RTDS na fyzické změny teploty, což ale vzhledem k vysokému zesílení OZ bez zpětné vazby neomezuje funkci zapojení.

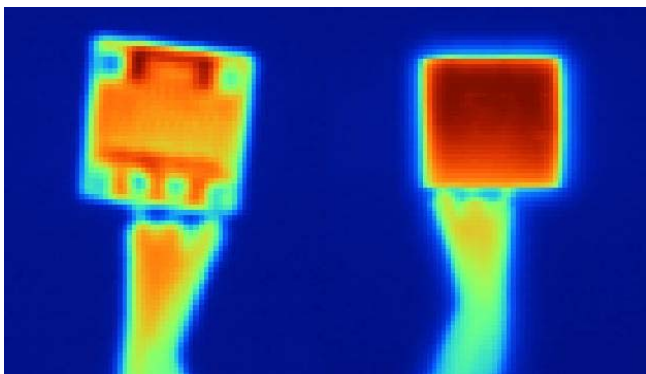


Obr.17: Skutečná topologie multimotivu jednoduchého RTDS

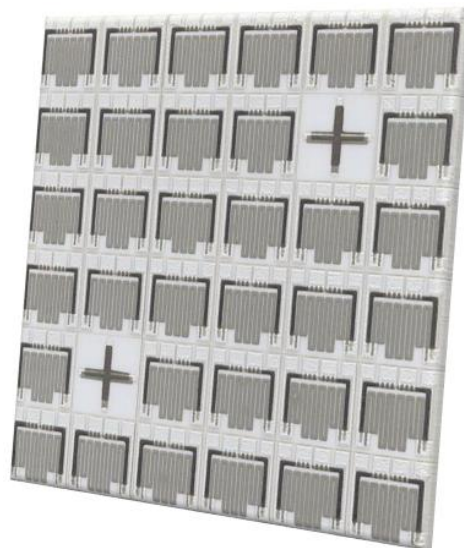


Obr.18: Ukázka sady masek jednotlivých funkčních vrstev struktury

Přestože pro danou aplikaci by stačila nízkovýkonová verze, jsem s ohledem na potenciální využití i v jiných aplikacích pro jistotu počítal až s 1W zatížením jednotlivého funkčního motivu. Teplotně nezávislé rezistory jsem umístil po stranách motivu, kde vzhledem k vyšší výkonové ztrátě oproti Pt rezistoru budou lépe kompenzovat zvýšenou ztrátu tepla sdílením s bezprostředním okolím soustavy na hranicích senzoru. Výsledkem byl návrh topologie viz Obr.17 a návrh sady masek podle Obr.18, kde část a) představuje vodivou propojovací síť, b) kontaktní pokovení rubové strany, c) odporová topná vrstva a část d) funkční teplotně závislou Pt vrstvu. Všechno jako multimotiv na rozměru 2"x2".



Obr.19: Snímek z termokamery jednoduchého RTDS

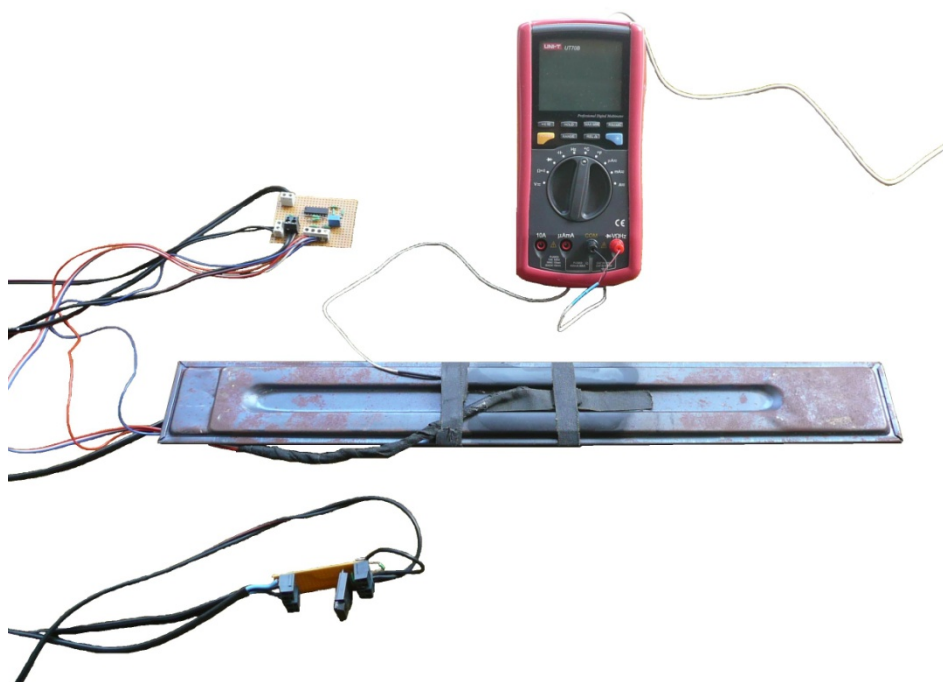


Obr.20: Realizovaný multimotiv jednoduchého RTDS

Potištěný a vypálený substrát před rozdělením na jednotlivé motivy reprezentuje Obr.20. Jednotlivý motiv senzoru opatřený vývody za funkce ve volném okolním prostředí reprezentuje snímek z termokamery na Obr.19. Levá část obrázku je lícová a pravá rubová strana senzoru.

Z vyrobených vzorků RTDS byl pro realizaci aplikace pojmenované jako regulátor teploty paketového tělesa náhodně vybrán jak RTDS, tak jeden z prvních funkčních vzorků termodynamického zapojení doplněného o bezkontaktní spínač síťového napětí 230 V/50 Hz podle Obr.7.

Uspořádání regulované soustavy je patrné z fotografie na Obr. 21. Jedná se o uspořádání s velmi volnou tepelnou vazbou paketu topného tělesa a senzoru RTDS, který byl k paketu přiložen tak, že na paket byla nejdříve nalepena elektroizolační páska, na ni volně přiložen RTDS, který jsem potom ještě zajistil omotáním dalších několika vrstev izolační pásky. RTDS jsem umístil zhruba uprostřed prohlubně těla paketu, tedy mimo přímý vliv topné spirály uvnitř paketu.

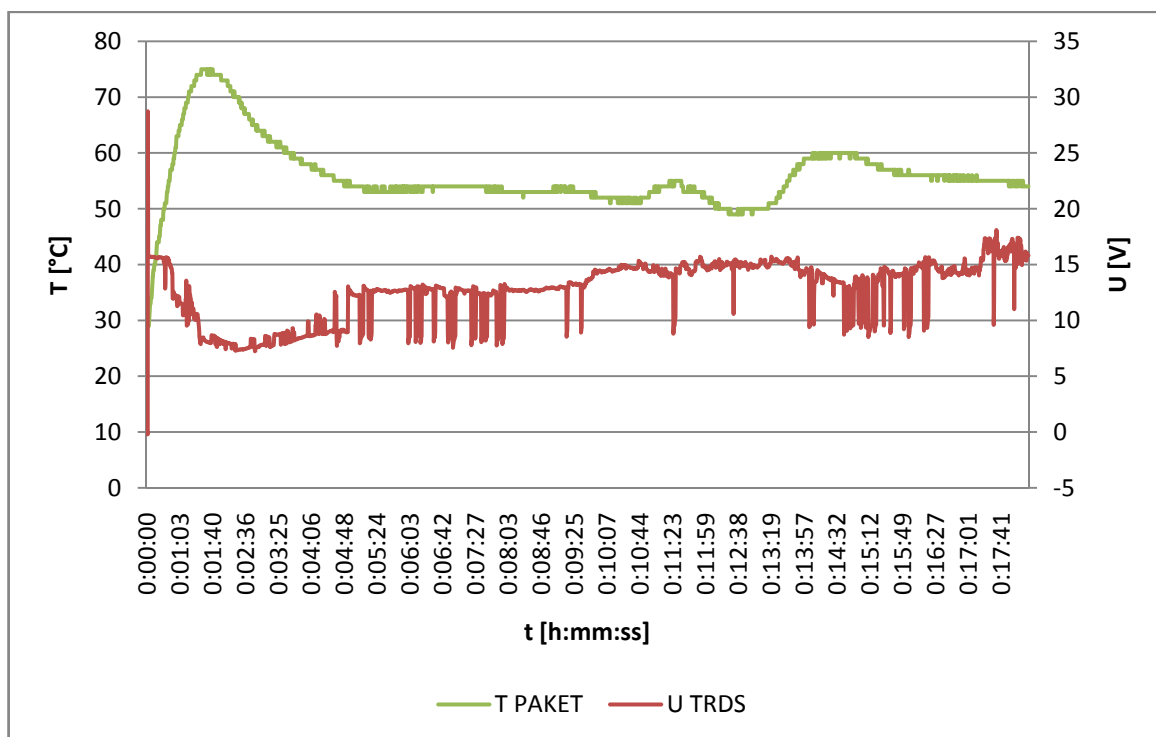


Obr.21: Demonstrace usporádání regulované soustavy během experimentu

Elektrotechnická bezpečnost byla zajištěna ochranným pospojováním kovového těla paketu ochranným vodičem na kolík ověřené síťové zásuvky v síti se samostatně rozvedeným ochranným vodičem a ochranou nadproudovým chráničem 10 mA. Ochrana proti případným tepelným účinkům topného tělesa při případné nefunkci regulátoru umístěním paketu na silnou ka podložku bez povrchových úprav.

Provozní bezpečnost potom prováděním funkční zkoušky při nastavení požadavku na relativně nízkou žádanou hodnotu teploty. Jako zdroj k napájení termodynamického zapojení byl použit zdroj Mesit 24 V/1A, ke snímání napětí U RTDS měřicí přístroj UT 60A, k měření teploty povrchu paketu přístroj UT 60B s termočlánkem standardního typu. Každý z nich byl připojen kabelem RS 232 k samostatnému PC pro záznam naměřených hodnot.

Synchronizace záznamů potom současným spuštěním záznamových SW na obou PC systémovým tlačítkem connect/disconnect. Oba záznamy pak byly sloučeny jako data souborů v prostředí excell a graficky vizualizovány ve společném grafu, jak je patrné z Obr.22.



Obr.22: Záznam rozvoje teploty povrchu paketu a napětí RTDS

V úvodní části (úsek 0:00:00 až 0:01:03) záznamu topí po zapnutí (okamžik 0:00:00) spirála tělesa plným výkonem (400 W) až do okamžiku než RTDS zaznamená termodynamickou reakci na jeho aktivitu. Teplo aktivity spirály se akumuluje nejdříve v její hmotě, odkud se postupně šíří do okolí, až dospěje k RTDS. Jeho signál prostřednictvím bezkontaktního spínače sice odpojí (okamžik 0:01:03) napájení spirály a ta přestane být aktivní. Přebytkem výkonu spirály se však v její a hmotě jí bezprostředního okolí naakumuloval přebytek tepla, který se postupně šíří (úsek 0:01:03 až 0:04:48) i směrem k RTDS. V tomto úseku teplota povrchu paketu nejdříve roste až po dosažení maxima (okamžik 0:01:20) začne klesat. Rychlost poklesu se řídí okamžitým rozdílem teploty povrchu oproti okolí, proto exponenciální pokles teploty a přibližování se k termodynamicky rovnovážnému stavu (bilanční rovnováha RTDS a jeho bezprostřední okolí). Pro RTDS žádaný stav. Po jeho dosažení bude mít RTDS tendenci v něm setrvat, tudíž nadále citlivě řídit dodávku příkonu topné spirály (úsek 0:04:48 až 0:10:07). Z průběhu napětí U RTDS je patrné, že se bilanční rovnováha postupně ustaluje v důsledku čehož postupně ubývá výraznějších odchylek od ní reprezentovaných prudkými poklesy U RTDS pod rovnovážnou bilanční úroveň až postupně zcela vymizí.

Od toto okažiku (0:10:07) jsem zjišťoval odezvy na pokusy o vyvedení soustavy z již ustavené termodynamické rovnováhy. Takové situace se fyzikálně jen těžko definovaně vyvolávají, proto jsem se spokojil s prudkým ofukováním různých částí povrchu paketu silným proudem vzduchu o okolní teplotě. Přitom jsem se snažil neofukovat místo, v němž jsem měřil teplotu povrchu termočlánkem.

Nejdříve (úsek 0:10:42 až 0:11:23) jsem ofukoval místu měření termočlánkem odvrácený konec paketu (cca $1/3$ až $1/4$ délky délky). Reakce je vcelku klidná, je zřejmé, že zvýšený odvod tepla intenzivním ochlazováním paketu byl zřejmě nahrazen zvýšenou dodávkou příkonu spirále paketu, což se v místě měření termočlánkem projevilo také mírným zvýšením teploty, které po přerušení ofukování (úsek 0:11:23 až 0:12:38) zase vymizelo.

Potom (úsek 0:13:19 až 0:15:00) jsem ofukoval naopak místu měření termočlánkem přivrácený konec paketu opět (cca $1/3$ až $1/4$ délky délky). Reakce je daleko bouřlivější, je zřejmé, že zvýšený odvod tepla intenzivním ochlazováním paketu byl opět zřejmě nahrazen zvýšenou dodávkou příkonu spirále paketu, což se ale v místě měření termočlánkem projevilo vyšším zvýšením teploty, které po přerušení ofukování (úsek 0:15:00 až 0:16:28) opět vymizelo.

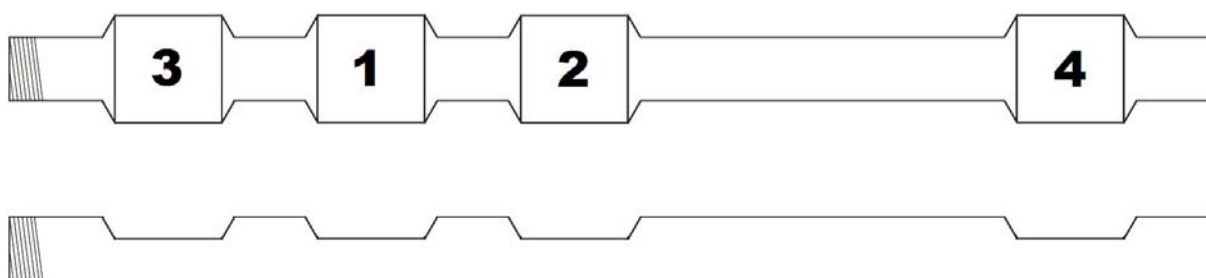
Buď byl ve druhém případě účinek ofukování oproti předchozímu daleko účinnější (např. lépe směřovaný nebo z menší vzdálenosti vedený proud vzduchu), nebo to souvisí s volbou místa instalace termčlánku. Dalo by se pravděpodobně vyslovit několik různých hypotéz, bez podrobnějšího prozkoumání a lépe fyzikálně definovaných podmínek experimentu by však vážně míněná obhajoba kterékoliv z nich byla až příliš odvážným a technicky nepodloženým počinem. Daleko podstatnější byl pro mě při hodnocení výsledků experimentu poněkud překvapivý fakt, že soustava se sice v zásadě chová podle předpokladů vložených do simulačního modelu formou výpočetních rutin, přesto však pravděpodobně ve prospěch aplikace poněkud odlišně. To v tom, že již po blízkém přiblížení se rovnovážnému stavu bilanční rovnováhy prakticky nevykazuje pozorovatelnou hysterezi podle simulovaných výstupů, přestože žádná taková hystereze nebyla do výpočetních rutin uměle zavedena.

Proto jsem přirozeně předpokládal, že se tak projevují termodynamické vlastnosti soustavy (zpoždění odezvy na aktivitu topné spirály s rostoucí vzdáleností od ní) a konečná citlivost Pt rezistoru na místní změny teploty, tedy i reálného signálu U_{RTDS} , stejně jako konečná citlivost reálného termodynamického zapojení na změny jemu vstupního signálu.

Zdá se, že reálnému chování senzoru a zapojení v průběhu experimentu v ustáleném stavu soustavy spíše odpovídá představa asymetricky nepravidelně cyklického střídání stavů. Dá se pouze odhadovat, že při kladných odchylkách od žádaného stavu opět bezhysterezní a při záporných odchylkách s hysterezní shora omezenou amplitudou odchylky. Tato fakta si v dalším zřejmě zaslouží bližší prozkoumání a po ověření poznání pravých fyzikálních příčin potom předdefinování předpokladů na nichž jsou postaveny výpočetní rutiny simulačního modelu a jeho úpravy v tomto smyslu, tak aby potom simulované výstupy odpovídaly realitě i v tomto smyslu.

Zdvojený RTDS

Nejjednodušší variantou, jak realizovat ověřovací vzorek signalizátoru opotřebení (nárustu tepelné aktivity odpovídající funkčnímu zatížení) byla realizace ze dvou jednoduchých RTDS získaných výběrem podle požadavku parametrů určených simulací. Ty vyžadují dvojici RTDS se shodným odporem R_T platinového rezistoru a blízkými, ale rozdílnými hodnotami R_T , tedy R_{T1} a R_{T2} umístěnou v soustavě blízko sebe ve směru teplotního spádu vyvolaného funkční aktivitou. Jelikož ověřování na cílovém objektu u budoucího uživatele by vyžadovalo náročnou přípravu a hodně času, navrhnul jsem zástupnou ověřovací soustavou v podobě ve čtyř místech přetvarované měděné tyčky, na niž jsem připájel čtveřici jednoduchých RTDS podle Obr. 23.



Obr.23: Ověřovací vzorek těla soustavy pro zkoušení dvojice RTDS

Usoudil jsem, že očekávanou funkci ověřím následovně. Pozici 3 osadím nízkoohmovým ($<10 \Omega$) a pozici 4 středněohmovým ($>20 \Omega$) vzorky RTDS bez výběru, pozice 1 a 2 potom vybranými vysokoohmovými ($>100 \Omega$) RTDS podle předchozího odstavce. RTDS na pozici 3 bude simulovat aktivitu funkčního zatížení, RTDS na pozici 4 bude simulovat aktivitu okolí, a na pozicích 1 a 2 bude ověřovaná funkční dvojice.

Přitom :

- pozice 3 bude napájena přímo ze zdroje nastavitelného DC napětí, takže půjde přestavovat jeho aktivitu a zástupně tak nastavovat ztráty míry opotřebení
- pozice 4 bude v základním termodynamickém zapojení, takže bude možné přestavovat její teplotu, jako zástupnou veličinu charakterizující změny teploty okolí
- pozice 1 a 2 budou zapojeny ve společném zapojení k monitorování změn tepelného toku
- pro omezení vlivu skutečné teploty okolí bude tělo soustavy včetně všech RTDS obaleno vrstvenou papírovou izolací tak, aby ale oba volné konce zůstaly okolním vzduchem ochlazovány

Ověřovací funkční zkoušku jsem pak provedl tak, že jsem:

- pozici jezdce potenciometru zapojení RTDS 4 jsem nejprve nastavil, aby byl napájen napětím cca 5 V, to reprezentuje jeho zástupnou teplotu bude mírně nad teplotou okolí (u různých vzorků měřeno dotykovým termočlávkovým teploměrem bez kompenzace na prvku nejbližším místě mimo papírovou izolaci cca 42 až 55 °C)
- zkontroloval jsem, že spoječné napájecí napětí RTDS 1 a RTDS 2 v monitorovacím zapojení je na úrovni blízké jeho napájecímu napětí (> 20V)
- k RTDS 3 jsem připojil zdroj nastavitelného napětí (0 až 24 V) k RTDS 3 a postupně jej od nuly zvyšoval za účelem určení limitní hodnoty, při níž dojde k prudlému poklesu napětí na zdvojeném senzoru (RTDS1+RTDS2) při němž jsem opět ověřoval teplotu RTDS3. (U různých vzorků cca 88 až 110 °C, měřeno obdobně jako u RTDS 4 v nejbližším přístupném místě mimo izolaci)
- Hodnota napětí těsně pod takto zjištěnou hodnotou potom dále zastupuje běžnou pracovní aktivitu válce a pístu
- Ověřil jsem v obou směrech necitlivost napětí na zdvojeném senzoru na změny pozice jezdce potenciometru v zapojení RTDS 4, tedy zástupné změny teploty okolí (Od teploty okolí do cca 60 °C)
- Přitom jsem následně po libovolném přestavení jezdce potenciometru ověřoval, že zapojení zdvojeného senzoru stále reaguje i na mírné zvýšení napětí na RTDS 3 a to stále na shodné úrovni a kontroval, že se fyzicky mění jeho teplota závisle na teplotě RTDS 4.

Takovými zkouškami jsem ověřil několik funkčních vzorků s dvojicemi RTDS 1 a RTDS 2 a zjistil jsem, že:

- Vlastní zdvojené zapojení pro monitorování tepelného toku, spádu či rozdílu teplot se chová podle výchozího předpokladu ověřeného předchozí simulací
- Jednotlivé dvojice i přes pečlivý výběr i při malých vzájemných odchylkách hodnot odporů (P_t a R_T) vykazují značné odchylky v indikovaných úrovních aktivity RTDS 3 zasupujících normálního pracovní zatížení.

Výsledky naměřených a odvozených hodnot jsou shrnuty v Tab.6.

vzorek RTDS č.	Odpor			použit v soustavě	
	Ω				
	Rt1	Pt	Rt2	jako	číslo
132	2,12	4,16	3,3	RTDS 3	1
145	3,16	3,65	2,37	RTDS 3	2
161	2,14	3,66	3,93	RTDS 3	3
122	3,96	4,01	3,02	RTDS 3	4
233	8,29	11,16	7,88	RTDS 4	1
252	7,63	8,11	7,66	RTDS 4	2
245	6,11	7,92	7,26	RTDS 4	3
253	8,66	9,25	5,92	RTDS 4	4
532	71,4	11,1	86,5	RTDS 1	1
536	72,6	10,9	85,4	RTDS 1	2
542	71,9	10,6	84,6	RTDS 1	3
722	72,5	10,8	85,6	RTDS 1	4
732	88,5	10,6	81,3	RTDS 2	1
735	89,2	10,7	82,5	RTDS 2	2
743	90,2	10,5	83,4	RTDS 2	3
733	88,4	10,6	82,9	RTDS 2	4

Soustava	T RTDS 4	T RTDS 3	Th RTDS 4	U RTDS 3	p RTDS 3
č.	°C			V	W
1	33	110	48	16,5	28,4
2	34	81	53	13,1	18,7
3	35	101	55	15,7	25,3
4	34	66	52	12,2	13,5

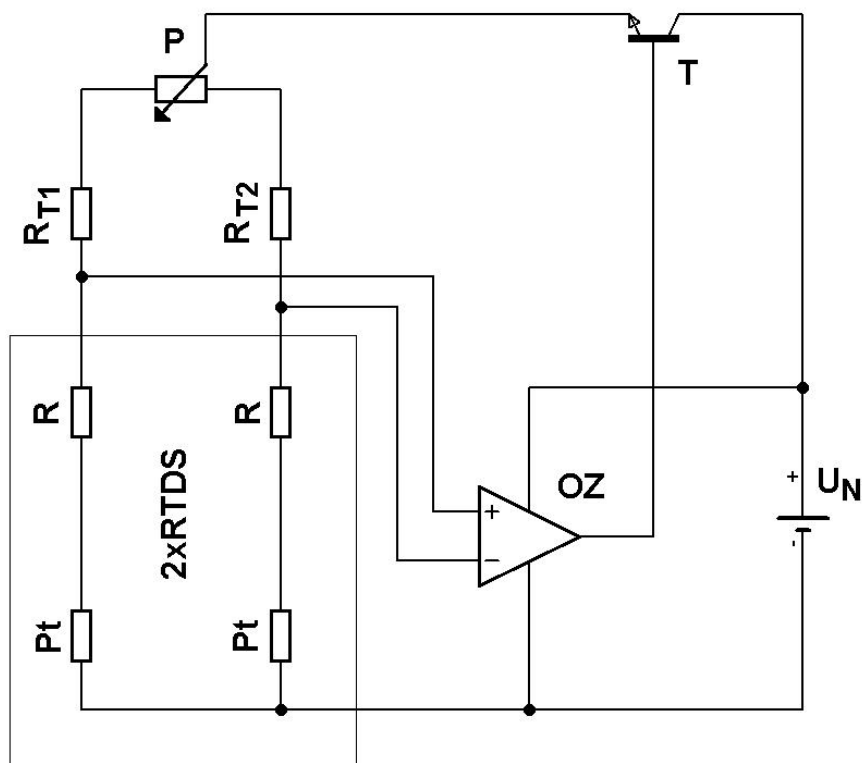
Tab.6: Tabulka vlastností použitých RTDS a funkčních vzorků

Z toho jsem usoudil, že toto řešení je vysoce citlivé na dodržení hodnot odporů motivu RTDS a vyvolává buď potřebu stanovení technologie výběru z velkého počtu kusů v rámci jedné výrobní série, nebo technologie přesného nastavování hodnot jednotlivých odporů rezistorů motivu RTDS.

Obojí je pracné a náročné na technologické vybavení, tudíž cenově nákladné a výrazně by omezilo konkurenceschopnost produktu.

To je proč jsem se pokusil hledat řešení spíše v úpravě zapojení tak, aby umožňovalo jednak hrubé přednastavení (přizpůsobení vlastnostem senzoru), jednak přesné dostavení v aplikaci. Simulací jsem ověřoval různá možná řešení, až jsem našel takové, které jednak připouští existenci obou RTDS na jediném společném substrátu ve zcela shodném uspořádání, přičemž nutné rozvážení se zajistí zvětší doplněním nestejných odporů ze společného napětí z výstupu OZ, tedy proudovým rozvážením.

Zdvojený senzor potom bude realizován na jediném substrátu podle topologie na Obr.25, k níž jsem jednoduchou úpravou navrhnul masky viz Obr.26. Výkres rýhování substrátů zůstane zachován.

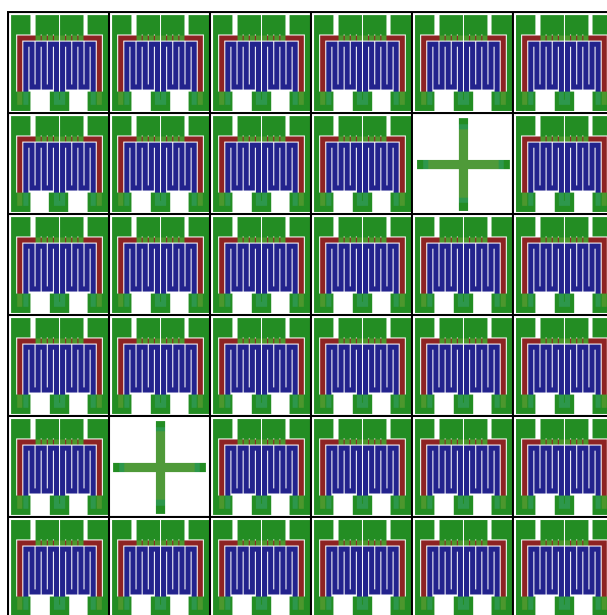


Obr.24: Upravené zapojení zdvojeného RTDS

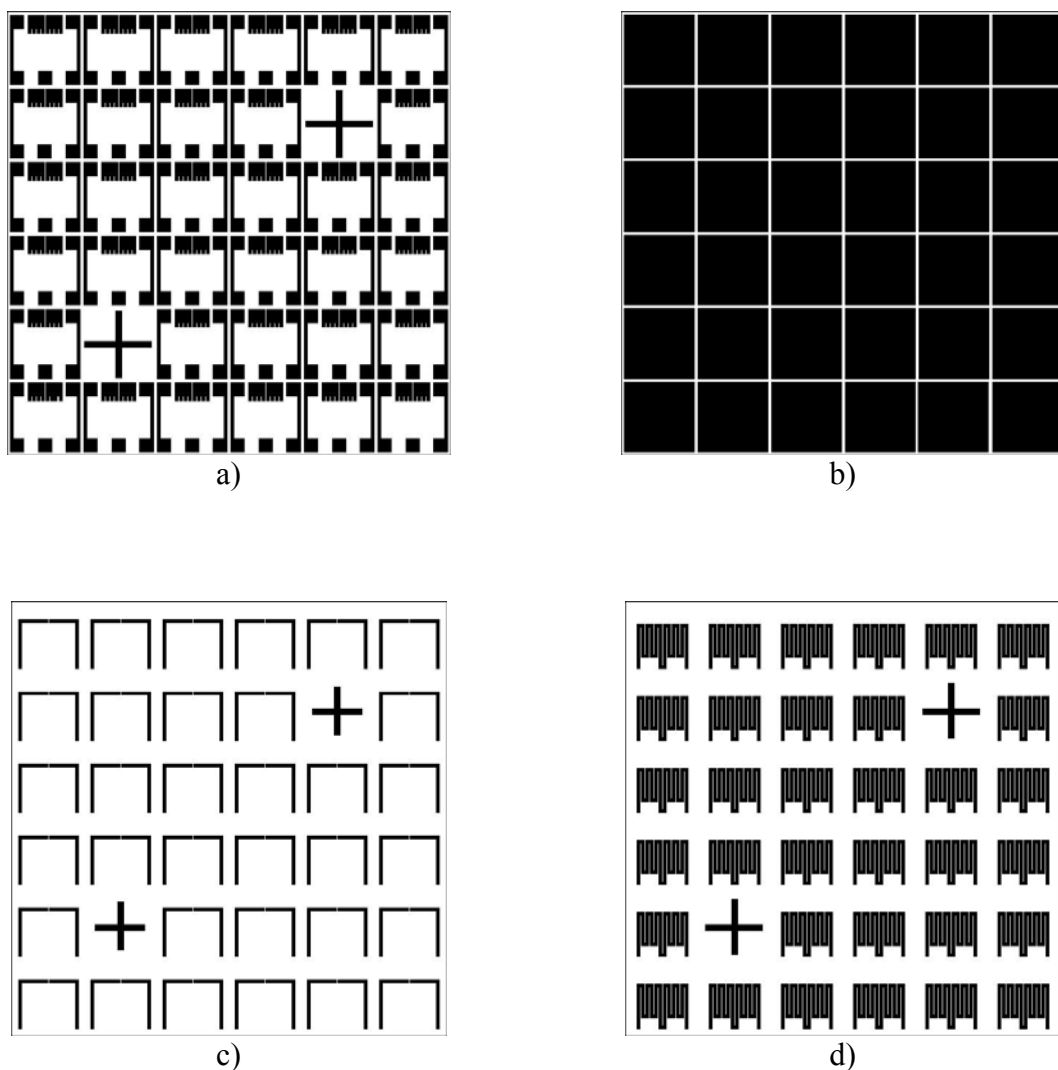
Zapojení se upraví podle Obr.24, tak že výkony obou shodných RTDS zdvojeného senzoru budou podle potřeby rozváženy doplněním obou shodných větví jednotlivých RTDS vnějšími nestejnými resistory . Tak bude každý zdvojený senzor zvenčí přizpůsobitelný dané aplikaci. Citlivé dostavení na aktivitu jednotlivého pístového čerpadla je možné změnou polohy jezdce potenciometru P

Podle upraveného zapojení jsem upravil výpočetní rutiny pro určení aktivit rozvážených RTDS a zatím bez promítnutí do geometrie modelu simuloval odezvy původní soustavy.

Nejpve jsem našel hodnoty rozvažovacích rezistorů a po té doplnil potenciometr P a simuloval odezvy pro různá α -nastavení jezdce potenciometru P. Výsledky pro $\alpha \in (0,1; 0,3; 0,6; 0,9)$ jsou patrné postupně z obrázků 27, 28, 29 a 30.



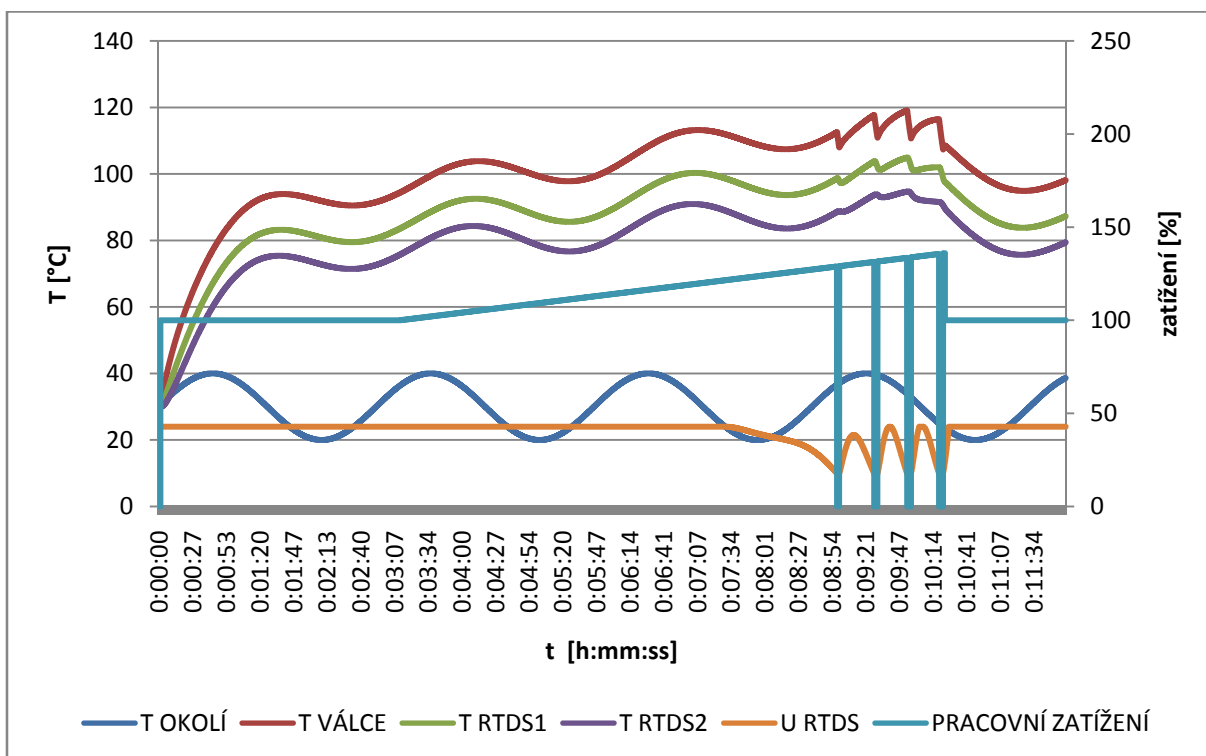
Obr.25: Topologie zdvojeného RTDS



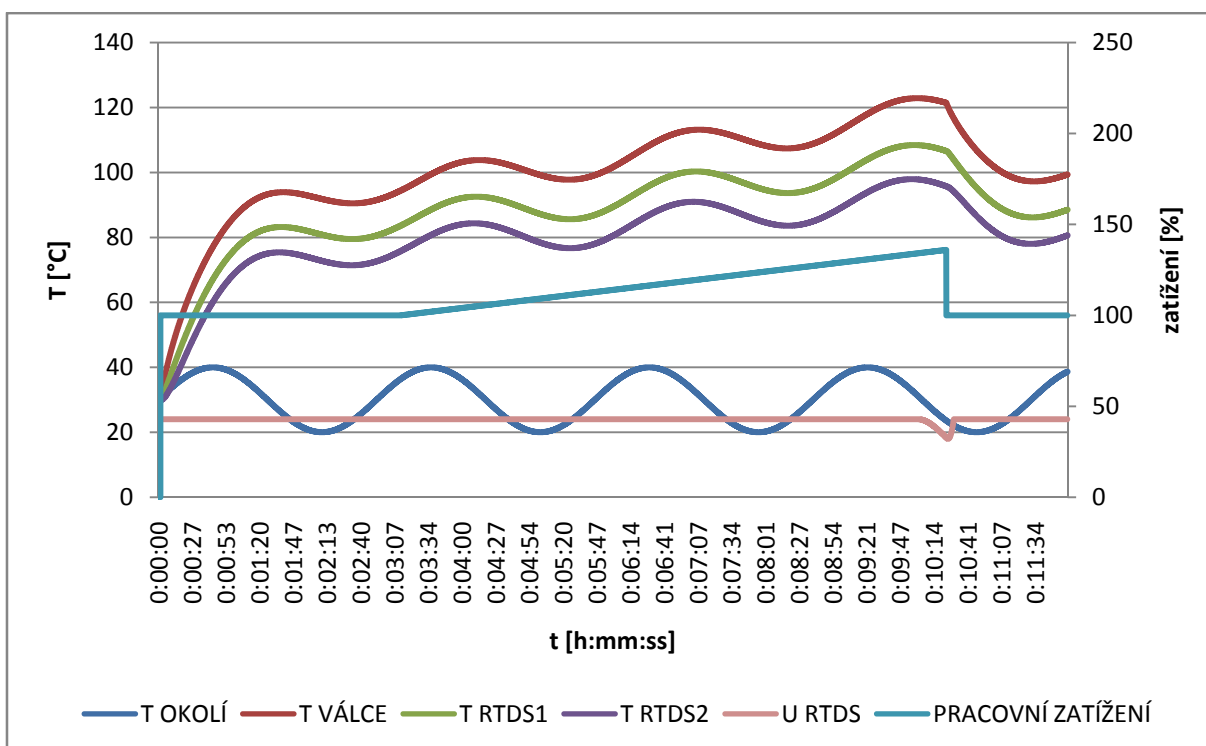
Obr.26: Ukázka sady masek zdvojeného RTDS

Obdobně jako u sady masek podle Obr.18, představuje i zde část a) vodivou propojovací síť, b) kontaktní pokovení rubové strany, c) odporovou topnou vrstvu a část d) funkční teplotně závislou Pt vrstvu. Všechno opět jako multimotiv na rozměru 2"x2".

V dané soustavě a zdvojenému senzoru se dají jak v simulaci, tak přímo u reálného objektu nalézt hodnoty rozvažovacích rezistorů. V realitě je to možné připojením hrubého potenciometru o hodnoty zhruba shodné, nebo menší, než součet hodnot odporů všech rezistorů zdvojeného senzoru a následným nalezením takové polohy jeho jezdcce, těsně pod níž zapojení začne při normálním (nebo u proměnně zatěžovaných zařízení maximálním) zatížení mít snahu začít zařízení (pumpu) odstavovat z provozu.



Obr.29: Regulační odezva soustavy se zdvojeným RTDS ($\alpha=0,6$)

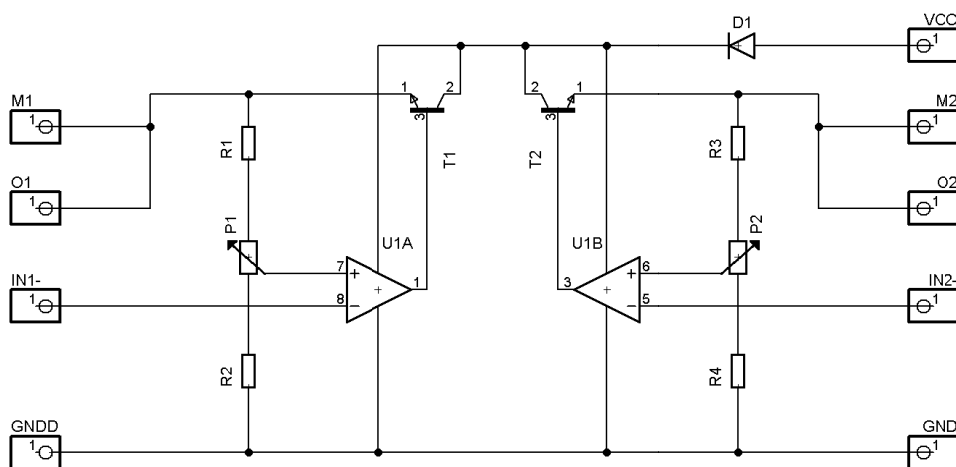


Obr.30: Regulační odezva soustavy se zdvojeným RTDS ($\alpha=0,9$)

Zapojení vykazuje prudký pokles napětí napájecího zdvojený senzor. Odpor potenciometru se rozdělí v poměru tohoto úhlu natočení na dva pevné rezistory, mezi něž se navíc zařadí ještě nový potenciometr o velikosti odporu o jeden až dva řády menším, než původní potenciometr. Nový potenciometr pak bude sloužit k jemnému (citlivému) dostavení na aktuální úroveň pracovní aktivity stroje.

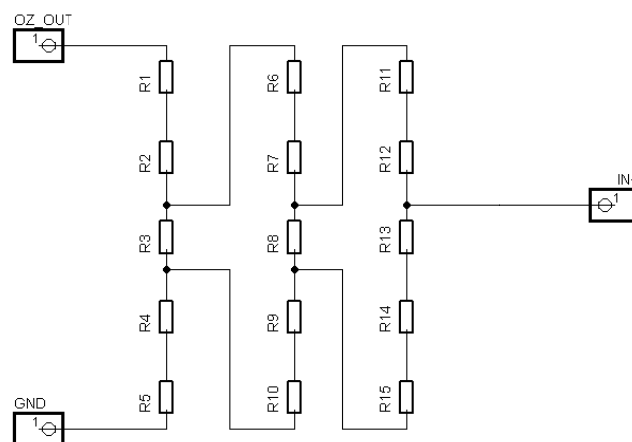
Termodynamické zapojení

Jedná se o dvojnásobné asymetrické zapojení pro bilanční termodynamický senzor. Obsahuje IO L272 SMD (dvojnásobný operační zesilovač). Vcc obvodu je odvozeno do maximálního dovoleného napájecího napětí IO, tj. max. 40V a maximálním výkonem 1W. Obvod viz. Obr.17 představuje prakticky výkonovou pumpu dodávající výkon k ohřevu termodynamického senzoru (dále jen TDS) na jemu vlastní pracovní teplotu. S rostoucí teplotou TDS roste napětí na vstupu IN- až do okamžiku kdy se dosáhne stavu $IN- = IN+$. Od té doby obvod dodává právě tolik energie, kolik je zapotřebí k udržení TDS na dosažené pracovní teplotě, tedy vlastně udržení rovnováhy $IN- = IN+$. Libovolná odchylka od takového stavu je zesílena maximálním zesílením OZ a příslušného tranzistoru tak, že ztráta energie na TDS je okamžitě kompenzována. Dioda D1 slouží jako ochrana proti přepólování napájecího napětí Vcc. Pracovní teplota TDS je přestavitelná změnou “polohy jezdce potenciometru” realizovaného pomocí odporů v dekadovém uspořádání umožňujícím postupně hrubé, běžné a jemné nastavení osazením příslušných odporů 0R. Pomocí kontaktních plošek IN-, O a GND se k obvodu buď přímo připojuje nízko-výkonový TDS, nebo další vnější kaskádně zapojený tranzistor pro výkonové zesílení vysoko-výkonových TDS. Plošky M slouží k odběru užitečného signálu zapojení.



Obr.31: Obvodové zapojení navrhovaného HIO

Návrh odporové sítě HIO:



Obr.32: Zapojení odporové sítě

Výpočet odporu / vrstevného odporu:
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} = R_v \cdot \frac{1}{w} = R_v \cdot A$$

- R hodnota odporu rezistoru [Ω]
- ρ měrný odpor [$\Omega \cdot m$]
- l délka odporu [m]
- S plocha průřezu odporu [m^2]
- w šířka odporu [m]
- t tloušťka odporu [m]
- R_v vrstevný odpor [Ω]
- A počet čtverců (poměr délky rezistoru ku šířce)

Výkonové zatížení rezistoru:
$$P = S_R \cdot P_0 = l \cdot w \cdot P_0$$

- P výkonové zatížení [W]
- P_0 měrné výkonové zatížení [W/mm^2]
- S_R plocha rezistoru

Výpočty:

$$P_{MAX} = \frac{U_{MAX}^2}{R_{MIN}} \Rightarrow R_{MIN} = \frac{U_{MAX}^2}{P_{MAX}}$$

Minimální hodnota odporu, která při největším možném výstupním napětí ještě vyhoví podmínce dovoleného výkonového zatížení je:

$$R_{MIN} = \frac{U_{MAX}^2}{P_{MAX}} = \frac{U_{MAX}^2}{P_0 \cdot n \cdot S} = \frac{40^2}{1 \cdot 5 \cdot 1,2} = \frac{1600}{6} = 266, \bar{6} \Omega$$

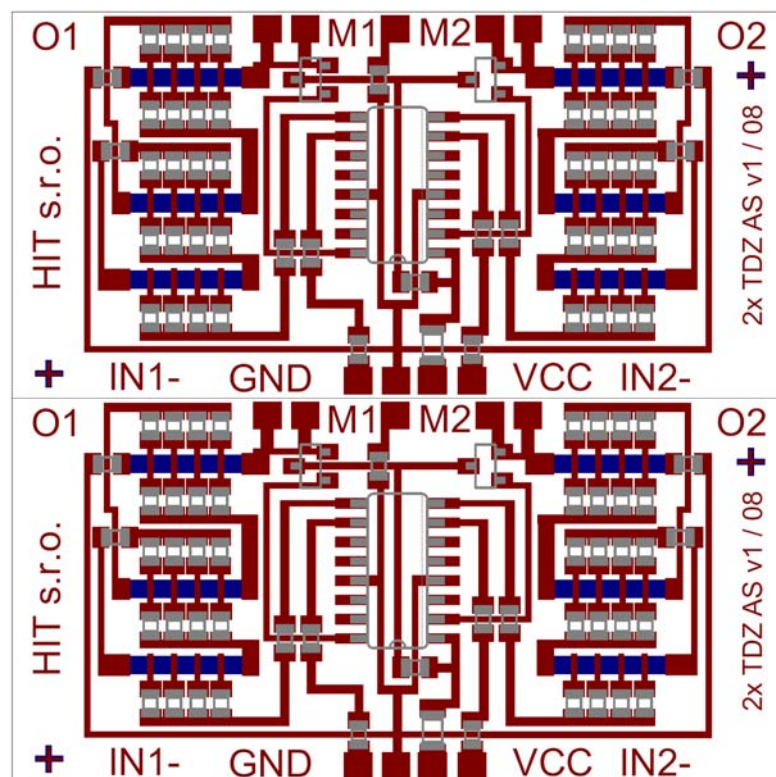
Bude-li tištěn z pasty o vrstevném odporu 1k, bude mít hodnotu 5kΩ a jeho skutečné výkonové zatížení bude:

$$P_0 = \frac{U_{MAX}^2}{P_{MAX}} = \frac{U_{MAX}^2}{R_c \cdot n \cdot S} = \frac{40^2}{5000 \cdot 5 \cdot 1,2} = \frac{1600}{30000} = 53, \bar{3} \text{ mW/mm}^2$$

Bude-li tištěn z pasty o vrstevném odporu 100Ω, bude mít hodnotu 500Ω a jeho skutečné výkonové zatížení bude:

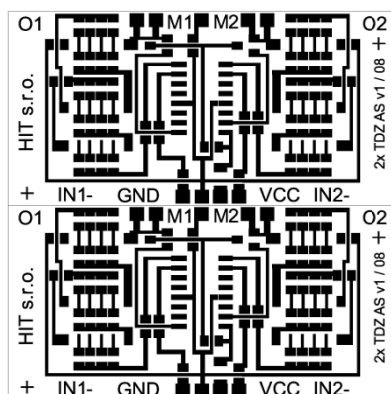
$$P_0 = \frac{U_{MAX}^2}{P_{MAX}} = \frac{U_{MAX}^2}{R_c \cdot n \cdot S} = \frac{40^2}{500 \cdot 5 \cdot 1,2} = \frac{1600}{3000} = 533, \bar{3} \text{ mW/mm}^2$$

V obou variantách vyhovuje s dostatečnou rezervou.

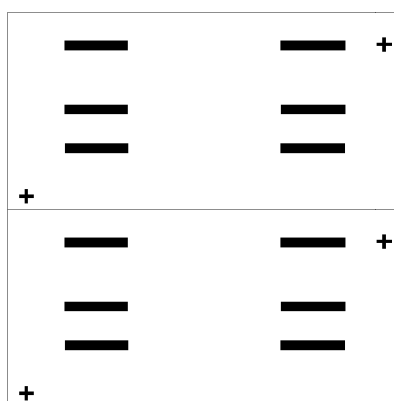


Obr.33: Soutisk masek HIO (pro názornost zvětšeno)

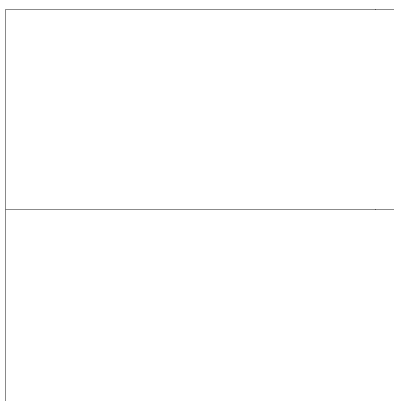
Podklady pro masku vodivé vrstvy 1:1



Podklady pro masku odporové vrstvy 1:1



Podklady pro rýhování substrátu 1:1 (substrát 2x2")



Obr.34: Masky jednotlivých funkčních vrstev HIO

Závěr a doporučení

Souhrnným cílem této práce bylo v souladu se zadáním zpracování studie, návrh, realizace, ověření a optimalizace termodynamického senzoru v aplikaci nahrazující klasický teplotní senzor.

Podružným cílem bylo získání nových poznatků umožňujících vzájemné porovnání vlastností klasických řešení s RTD teplotními senzory a potenciálních nových řešení s RTDS termodynamickými senzory, z čehož by se dalo usuzovat na smysluplnost úsilí věnovaného v poslední době rozvoji poznání směřujícího k prosazení nového pohledu a přístupu k řešení týkajících se obecně monitorování stavu, signalizace mezních stavů a regulace termodynamických soustav.

Proto byl rozsah studie výhradně omezen pouze v tomto smyslu, tedy na srovnání klasických RTD senzorů a podmínek instalace z pohledu korespondujícího s nově prosazovaným přístupem v souvislosti se snahou o uplatnění RTDS. Takový přístup umožnil takový výběr aplikací v nichž by mohly být odlišnosti obou koncepcí rozlišitelné a tudíž i porovnatelné. Odtud výběr první, v klasickém pojetí dnes již plně standartizované aplikace jako regulátoru, s nímž v klasickém řešení vládne všeobecná spokojenost uživatelů. Výběr druhé aplikace, které by mohlo v novém pojetí pomoci uspokojit dosud nespokojeného uživatele právě uplatněním nového přístupu k řešení. V tomto smyslu zpracovaná studie splnila svůj účel zcela.

Prvním praktickým krokem byla úprava základního termodynamického modelu (dosud velmi jednoduchého), ale zatím také jediného, u nějž byl dříve definován RTDS jako zvláštní aktivní prvek, vyhovující jeho teoretické definici. Tento výchozí model byl doplněn pro každou z uvažovaných aplikací o rutiny definující vzájemnou interakci RTDS a všech ostatních aktivních i neaktivních prvků soustavy definovaných pomocí geometrické mapy a tabulky materiálových vlastností včetně rutiny definující zpětnou vazbu vybrané aktivity prvku soustavy přes signálovou odezvu RTDS. To nakonec umožnilo generovat vizualizovatelné odezvy libovolných prvků soustavy na definovatelné podněty. Doplněna byla také rutina umožňující posouzení vlivu změn soustavě okolního prostředí. V tomto smyslu realizované obě vzájemně odlišné úpravy simulačního modelu splnily svůj účel v zadaném rozsahu vyhovujícím potřebě dalších etap řešení.

Druhým krokem bylo generování vizualizovaných výsledků simulací popisujících očekávané chování soustav v každé z aplikací podle předem definovatelných podmínek vzájemných tepelných vazeb v soustavě a signálových vazeb v elektrickém zapojení. Ty potom umožnily vytvoření vlastnostmi simulací ovlivněných představ o chování soustav v obou uvažovaných aplikacích. V tomto smyslu výstupy simulací u obou aplikací splnily svůj účel v zadaném rozsahu vyhovujícím potřebě dalších etap řešení.

Třetím krokem byl vlastní výchozí variantní návrh RTDS pro každou z aplikací vyhovující výchozím teoretickým představám o chování ideálního RTDS účelově korigovaným za účelem přizpůsobení konkrétní aplikace. Korekce byly odvozeny jednak od praktických výstupů obou simulací z předchozích etap a současně od omezení, vyplývajících z podmínek předpokládané realizační technologie. V tomto smyslu návrhy RTDS včetně výstupů umožňujících technickou přípravu výroby obou aplikací splnily svůj účel v zadaném rozsahu vyhovujícím potřebě dalších etap řešení a potřebám externích dodavatelům TPV (masky, síta, rýhovací podklady apod.).

Vlastní RTDS pro obě aplikace (tisk a výpal) jsem realizoval podle zavedených pravidel na úrovni blízké se s malou rezervou možnostem pracoviště v laboratoři tlustých vrstev Ústavu mikroelektroniky FEKT VUT Brno. Vlastní zapojení ve výzkumně vývojové laboratoři zadavatele. Oboje s výsledkem plně vyhovujícím potřebám dalších etap řešení. Základní prověření realizovaných senzorů a zapojení včetně základního funkčního ověření potom střídavě v laboratořích školy a zadavatele podle časových a prostorových možností. Zástupné fyzické modely soustav pro aplikační zkoušky byly poskytnuty zadavatelem, vlastní ověřovací zkoušky včetně vyhodnocení a zpracování výsledků jsem potom střídavě opět podle časových a prostorových možností prováděl střídavě na obou místech. Vše s výsledkem plně vyhovujícím potřebám dalších etap řešení.

Rozborem dosažených výsledků výsledků obsažených v této práci bylo postupně:

- Potvrzena hypotéza o možnosti uplatnění RTDS i jako nejméně rovnocenné náhrady klasických řešení s RTD teplotními senzory
- Potvrzena hypotéza o přínosnosti uplatnění RTDS i v aplikacích, kdy jsou klasická řešení svými vlastnostmi na technické mezi požadavků uživatele a splňují je jen s obtížemi, nedostatečně nebo jen z části
- Hypotéza o dosažitelnosti přínosů klasickými přístupy nedosažitelných
- Hypotéza o vysoké universalitě řešení s uplatněním RTDS
- O výhodnosti komplexního řešení (současné řešení soustavy, systémů měření, signalizace a regulace s využitím RTDS)

Hlavním obecným přínosem práce z pohledu rozvoje poznání je potvrzení hypotézy o tom, že na rozdíl od monitorování soustav odvozeného od teploty jako základní stavové skalární veličiny může vhodně aplikovaný RTDS jako prostředek dynamicky monitorující soustavu prostřednictvím tepelných toků (vektorová veličina) přispět k lepší poznatelnosti soustavy. To evokuje novou představu, že dosavadní řešení jsou pravděpodobně jen zvláštním mezním případem obecnějšího, tedy univárzelnějšího řešení s RTDS.

Z pohledu očekávaného pokračování aplikovaného výzkumu podstaty RTDS a jeho interakcí s obecnou soustavou je mimo výše uvedeného konkrétním výstupem této práce:

- Doplnění výchozího modelu s představou RTDS jako ideálního prvku termodynamické soustavy o představu zpětnovazebního propojení s vnějším elektrickým termodynamickým zapojením ve vzájemné interakci umožňující simulaci dynamiky regulačních procesů
- Zjištění a vyjmenování odlišností chování reálných zástupných modelů od představ aktuálně implementovaných v současně známých prostředcích pro simulace k podrobnému prozkoumání
- Návrh, realizace a základní ověření vůbec prvního na jedné straně dosud nepopsaného typu senzoru tepelného toku, teplotního spádu či dynamického rozdílu teplot (v práci popsán jako zdvojený RTDS) se širokým předpokládaným spektrem aplikačních využití na straně druhé.

Pokračující základní i aplikovaný výzkum na dobře rozpracovaných základech slibuje dosažení v širokém spektru komerčně využitelných přínosů a jeho pokračování slibuje s vysokou pravděpodobností rychlou návratnost vynaložených prostředků a úsilí a bude jistě i rychle návratný.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DIN EN 60751
- [2] Řezníček Z. Sr., Szendiuch I, Řezníček M., Řezníček Z. ml.: Termodynamická sensorika, samostatná publikace k projektu FT-TA4-0110 TANDEM-BASEMO Výzkum technologie monitorování termodynamické rovnováhy bilančními senzory a její průmyslové aplikace, VUT Brno 2007
- [3] Řezníček Z. Sr., Szendiuch I, Tvarožek V., Řezníček M., Řezníček Z. Jr.: Thick Film Sensor for Temperature Balanced Process Monitoring, International Conference IMAPS US 2007 San Jose, USA, November 11-15 2007,
- [4] Řezníček Z., Tvarožek V., Řezníček M., Szendiuch I.,: Hybrid Constant Temperature Regulator, International Conference EuroSimE It 2006 COMO, Italy, April 15-16 2006
- [5] Tvarožek V., Vavrinský E., Řezníček Z.: Novel approach in ratiometric technique of sensing, J. of Electrical Engineering, 58 (2007), 2, 98-103
- [6] Řezníček Z., Tvarožek V., Řezníček M., Szendiuch I.: Temperature balanced process media energy activity monitoring, International Conference EDS-IMAPS CS 2005 Brno, Czech Republic, September 15-16 2005