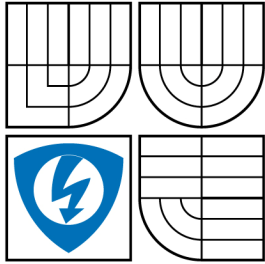


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍHO PRVKU JAKO SOUČÁSTI ELEKTRONICKÉHO SYSTÉMU

MODELING OF ELEMENTAR PART AS COMPONENT OF ELECTRONICS SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

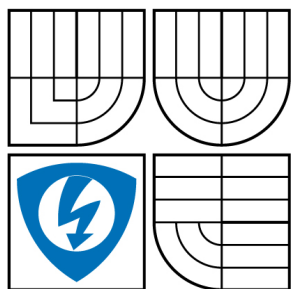
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BOLESLAV PSOTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. IVAN SZENDIUCH, CSC.

BRNO 2007



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Psota Boleslav

ID: 83314

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Modelování teplotního prvku jako součásti elektronického systému

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti pouzdření moderních elektronických systémů a zpracujte návrhový postup. Vytvořte model elementárního prvku a definujte jeho termodynamické chování z pohledu základního elementu elektronického systému

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUTIUM, 2006

Termín zadání: 1.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práve třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Boleslav Psota
Bytem: Tlumačov, Dolní 10, 763 62
Narozen/a (datum a místo): 5.4.1985, Zlín

(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: Modelování teplotního prvku jako součásti elektronického systému
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

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: 29. 5. 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Práce se zabývá chováním teplotně závislého prvku, který tvoří část termodynamického systému. Tento element tvoří základ pro moderní elektrická pouzdra a 3D systémy. Cílem práce je analyzovat a objasnit chování takového prvku a následně vyřešit jeho virtuální model pro teplotně závislý systém. V závěru jsou pak naznačeny jeho některé praktické aplikace.

Abstract:

This work deals with behavior of the temperature dependent element that makes a part of thermodynamics system. The analyzed element makes a base for modern electronic packages and 3D systems. The aim of this work is to analyze the behavior of that element and to solve the virtual model of temperature dependent system. There are shown some practical applications as well.

Klíčová slova:

Senzor, elementární model, interakce

Keywords:

Sensor, elementar model, interaction

Bibliografická citace díla:

PSOTA, B. Modelování teplotního prvku jako součásti elektronického systému. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské 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 29. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Ing. Zdeňkovi Řezníčkovi z firmy HIT s.r.o. za poskytnutou metodickou pomoc a cenné odborné rady.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor:	Boleslav Psota
Název závěrečné práce:	Modelování teplotního prvku jako součásti elektronického systému
Název závěrečné práce ENG:	Modeling of elementar part as component of electronics system
Anotace závěrečné práce:	Tato práce se zabývá chováním teplotně závislého prvku, který tvoří část termodynamického systému.
Anotace závěrečné práce ENG:	This work deals with behavior of the temperature dependent element that makes a part of thermodynamics system.
Klíčová slova:	Senzor, elementární model, interakce
Klíčová slova ENG:	Sensor, elementar model, interaction
Typ závěrečné práce:	bakalářská práce
Datový formát elektronické verze:	formát pdf
Jazyk závěrečné práce:	čeština
Přidělovaný titul:	Bc.
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 a technologie

1	ÚVOD	8
2	TEPLOTNÍ MANAGEMENT	9
2.1	PŘENOS TEPLA VEDENÍM (KONDUKCE)	10
2.2	PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM (KONVEKCE)	11
2.3	PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM (RADIACE)	13
3	CHOVÁNÍ TERMODYNAMICKÝCH SOUSTAV	15
3.1	TEORIE	15
3.2	VYUŽITÍ PRO TERMODYNAMICKÝ SENZOR	17
4	SIMULAČNÍ PROGRAM FLOTHERM	18
4.1	TVORBA MODELU	19
4.2	INTEGRACE S MCAD A EDA	19
4.3	ROZVODNÁ SÍŤ	19
4.4	METODA CFD PRO VÝPOČTY	20
4.4.1	<i>Přehled</i>	20
4.4.2	<i>Matematická reprezentace</i>	20
4.4.3	<i>Metoda řešení</i>	21
4.4.4	<i>Postup použitého algoritmu</i>	22
4.4.5	<i>Definování sítě</i>	23
4.4.6	<i>Interpretace výsledků</i>	23
4.5	VIZUALIZACE	24
4.6	POUŽITÍ PROGRAMU PŘI VÝUCE	25
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
5.1	TEPLOTNÍ PRVEK	27
5.2	SIMULACE	28
5.3	PRAKTICKÁ APLIKACE SENZORU	32
6	ZÁVĚR	37
7	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE	38

1 Úvod

Elektrické systémy se potýkají z nejrůznějšími problémy, které je třeba řešit v průběhu jejich návrhu. Jednou z nejdůležitějších oblastí, která je provázána řadou problémů, je vliv tepla na daný systém. Každé elektrické zařízení spotřebovává určité množství energie, přičemž průvodním jevem je přeměna elektrické energie právě na tepelnou. Tím je v podstatě dáno tepelné ovlivnění jakéhokoliv elektrického zařízení. Vzhledem k tomuto faktu je tudíž velice důležité správně vyhodnocovat a následně řešit teplotní otázky daného systému.

Abychom se mohli zabývat tepelným ovlivňováním elektrických systémů, musíme si nejdříve uvědomit chování termodynamických soustav. Definovat možnosti přenosu tepla a v návaznosti také řešit tepelný tok v systému.

Termodynamické soustavy jsou charakterizovány pouze dvěma stavy, a to ustáleným a neustáleným. Monitorování teploty využívá stavu ustáleného, neboť teplota je stavová veličina, přitom změně teploty předchází změna tepelné aktivity některého z prvků systému. Teplota nám tedy kvůli své povaze může v neustáleném stavu pouze ukázat vývojový trend, proto je snaha o přechod na monitorování pomocí sledování změn aktivit (stavu) termodynamického systému, místo stavových důsledků, tedy změn teploty.

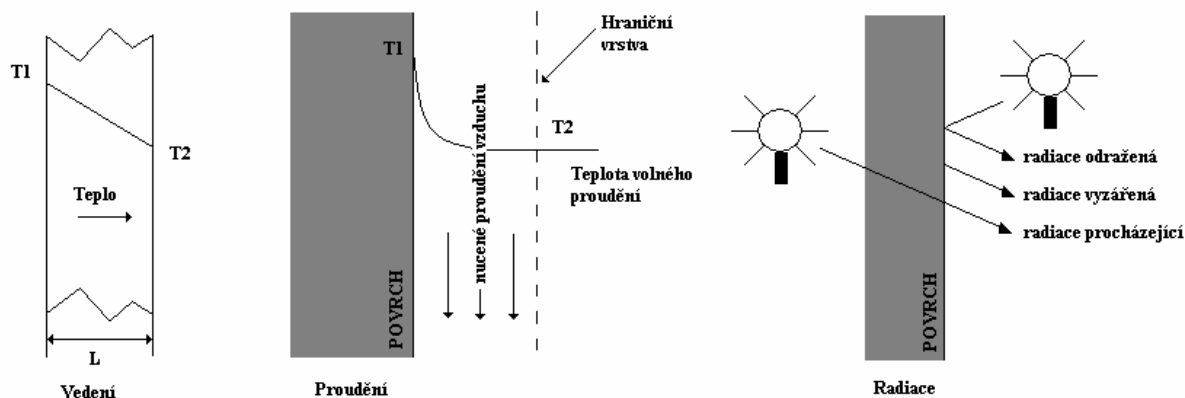
Jednou z moderních metod řešení teplotních vlivů, která předchází samotnému návrhu, je simulace pomocí počítačových programů. Existuje řada nejrůznějších produktů, které řeší různé oblasti problematiky tepelného managementu, proto před samotnými simulacemi čeká řešitele možná ještě důležitější krok, a to výběr simulačního programu, který by byl nejvhodnější pro daný problém. Vzhledem k velkému množství programů se proto často řeší tato otázka výběrem dvou či více simulačních programů pro jednu problematiku. Tím dosáhneme více výsledků, které potom můžeme zpětně porovnávat a vyhodnocovat. Při výběru pouze jednoho programu pak je dobré každou simulaci několikrát opakovat. Výsledky však, i přes dnes již téměř dokonalé simulace, musíme na závěr stejně ještě ověřit v praxi, abychom měli jistotu správně navrženého modelu.

2 Teplotní management

Před samotným započítáním modelování teplotního prvku v systému je nutné si uvědomit základní pravidla termodynamiky.

Termodynamická soustava se může nacházet jen ve dvou stavech, a těmi jsou ustálený a neustálený stav. V ustáleném stavu jsou v každém místě soustavy stálé teplotní poměry, čili si každé místo zachovává konstantní teplotu. Teplota však může být pro jednotlivé oblasti různá, ale díky tomu že je ustálený teplotní tok nedochází k přenosu tepla. Neustálený stav je děj mezi dvěma ustálenými stavy, kdy se teploty mění na různých místech systému v čase.

Vzhledem k tomu, že v elektrických systémech je většinou teplotně proměnné prostředí, je důležité si uvědomit jak se teplo přenáší. Přenos tepla se může uskutečňovat třemi cestami a to vedením, prouděním a zářením (obr. 1). Často se používá také převzatých označení kondukce, konvekce a radiace.



Obr. 1: Základní principy přenosu tepla (podle[1])

2.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

Při přenosu tepla vedením dochází k vzájemnému předávání kinetické energie sousedících molekul, částice látky v oblasti s vyšší kinetickou energií předávají část své energii částicím s nižší kinetickou energií prostřednictvím srážek. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh.

Při přenosu tepla vedením se musíme zmínit o některých důležitých veličinách. Pravděpodobně nejdůležitější veličinou je tepelný tok Φ , ten je definován diferenciálním podílem tepla dQ , které projde plochou S za čas dt , to můžeme vyjádřit jako [2]:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

kde Φ je tepelný tok ($W=J.s^{-1}$),

dQ je teplo prošlé za čas dt (s) plochou, (J),

Další důležitou veličinou je hustota tepelného toku q , tu zavádíme pokud počítáme přenos tepla jednotkovou plochou, můžeme ji definovat diferenciálním podílem tepelného toku $d\Phi$, který prochází elementární plochou dS a velikosti této plochy [2]:

$$dq = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2)$$

kde q je hustota tepelného toku ($W.m^{-2}$),

dS je element plochy, jenž musí být kolmý ke směru šíření tepla.

Pro konečné určení sdílení tepla vedením je nutné ještě vzít v úvahu součinitel tepelné vodivosti λ . Ten udává číselné množství tepla, které projde za jednotku doby krychlí o jednotkové hraně mezi dvěma protilehlými stěnami, mezi nimiž je teplotní rozdíl 1K ($^{\circ}C$).

Přenos tepla vedením je popsán Fourierovým zákonem, ten říká, že plošná hustota tepelného toku je úměrná teplotnímu gradientu a součiniteli tepelné vodivosti a směřuje proti gradientu [2]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (3)$$

Úpravou Fourierova zákona pro jednorozměrný případ a zanedbáním tepelné kapacity materiálu získáme vztah [2]:

$$\Phi = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (4)$$

- kde Φ je tepelný tok prošlý plochou A (W),
 λ je součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
A je plocha kolmá k tepelnému toku (m^2),
 ΔT je rozdíl teplot (K; °C),
D je vzdálenost míst rozdílné teploty (m).

Jak již bylo výše uvedeno, přenos tepla vedením je uskutečňován pomocí kmitání částic. Přenos tepla zapříčiňují fiktivní částice, které nazýváme fonony. K vedení tepla dochází prostřednictvím srážek těchto částic. Na vedení se ovšem ještě podílí volné elektrony. Proto vodiče proudu, které mají dostatek volných elektronů jsou také dobrými vodiči tepla. Naopak izolanty ve většině případů příliš dobře teplo nevedou, kvůli nedostatku volných elektronů.

2.2 Přenos tepla prouděním (konvekce)

Přenos tepla prouděním je charakterizován přestupem tepla mezi povrchem tuhého tělesa a kapalinou či plynem, který jej obklopuje. Můžeme rozlišovat proudění volné, které vzniká samovolně a proudění vynucené, které vzniká vlivem vnějšího média, jakým může být například ventilátor.

U volného proudění, často označovaného jako přirozené, je vedení vyvoláno tělesem, které molekulám plynu odevzdává teplo. Ohřátý plyn stoupá proti směru gravitace a na jeho místo proudí plyn, který je chladnější mající teplotu okolí. Rozdíl teplot mezi povrchem tělesa a okolním plynem (chladícím médiem) je potom dán [2]:

$$\Delta T = \frac{\Phi}{\alpha \cdot S} \quad (5)$$

kde ΔT je rozdíl teplot (K; °C),
 Φ je tepelný tok,
 α je součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$),
 S je povrch tělesa (m^2).

Součinitel přestupu tepla vyjadřuje vlastnosti rozhraní dvou látek odlišných skupenství z hlediska šíření tepla. Závisí na druhu látek, jejich skupenstvích, teplotách a na tvaru rozhraní. Jeho přímé určení je velice složité, proto se používá často tabulkových hodnot.

Přesný matematický popis proudění tepla je velice složitý, proto se často řeší tyto případy pomocí matematicko-experimentálního postupu. Nejčastějším problémem je přestup tepla, který se řídí Newtonovým ochlazovacím zákonem [2]:

$$\Phi = \alpha \cdot A_S \cdot (T_S - T_A) \quad (6)$$

kde Φ je tepelný tok z povrchu do okolí (W),
 α je součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$),
 A_S je obsah teplosměnné plochy (m^2),
 T_S je teplota povrchu,
 T_A je teplota okolního prostředí.

2.3 Přenos tepla zářením (radiace)

Tepelné záření (též infračervené záření) je jeden ze způsobů šíření tepla, při kterém každé těleso s teplotou vyšší než 0°K teplo vyzařuje do okolí, pro přenos energie není potřeba žádné přenosové prostředí, tudíž tento děj může probíhat i ve vakuu. Tepelná energie je přenášena ve formě elektromagnetického záření. V souvislosti s tepelným zářením se také hovoří o sálání. Relativní emise povrchu reálného tělesa ε je menší než 1 a je definována jako poměr zářivého toku emitovaného tělesem a toku vyzářeného černým tělesem [2]:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (7)$$

kde ε je relativní emise reálného povrchu (-),

E je emise reálného tělesa,

E_b je emise černého tělesa.

Přičemž u dokonalého zářiče se hodnota relativní emise blíží 1 a u dokonalého zrcadla k 0. Upravením Stefan-Boltzmannova zákona potom dostáváme vztah pro závislost intenzity záření absolutně černého tělesa na teplotě [2]:

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (8)$$

kde Φ je vyzářený tepelný tok (W),

ε je relativní emise povrchu (-),

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,

A je obsah plochy tělesa (m^2),

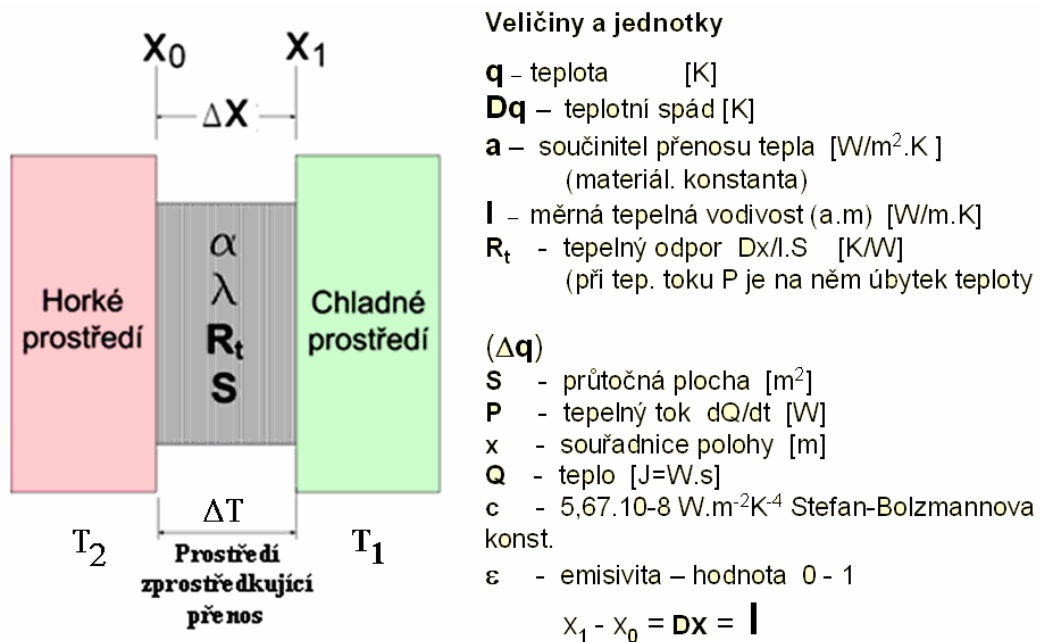
T je teplota povrchu (K).

Tepelný přenos mezi dvěma tělesy způsobený zářením je tedy potom dán [2]:

$$\Phi = S \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

- kde Φ je vyzářený tepelný tok (W),
 ε je relativní emise povrchu (-),
 σ je Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
 A je obsah plochy tělesa (m^2),
 T_1 je teplota povrchu (K),
 T_2 je okolní teplota (K),
 S je faktor zastínění v rozmezí 0 až 1

Množství tepla je obecně funkcí teplotního spádu Dq , činné plochy S a součinitele přenosu α , specifického pro každý jednotlivý způsob přenosu tepla.[2]



Obr. 2: Zobrazení přenosu tepla (podle [3])

3 Chování termodynamických soustav

3.1 Teorie

Před popisem chování termodynamických soustav je nutné si definovat tyto soustavy jako aktivní a pasivní termodynamické soustavy a s nimi související termo-aktivní, respektive termo-pasivní prvky.

Každá termodynamická soustava obsahuje určitý známý počet termo-aktivních prvků a pasivních prvků, které jsou obklopeny jejich okolím. Přičemž termo-aktivní prvky můžeme rozdělit na pozitivně a negativně termo-aktivní prvky, jejichž definice jsou následující:

- Jako pozitivně termo-aktivní prvek můžeme označit zdroj tepla uvnitř soustavy. Ten akumuluje energii dodanou mu zvenčí na tepelnou energii, kterou potom dále předává do svého okolí a tím teplotně ovlivňuje prvky jemu blízké.
- Negativně termo-aktivní prvek je v podstatě opakem pozitivního, přičemž je schopen tepelnou energii ze svého okolí přijímat a odvádět mimo systém. Typickým příkladem negativního termo-aktivního prvku může být chladič.
- Termo-pasivním prvkem je potom každý neaktivní prvek, tedy ten který žádnou tepelnou energii nevydává, ani nepřijímá.

Pokud se v soustavě vyskytne prvek, který přechodně spotřebovává, či uvolňuje tepelnou energii, můžeme jej označit jako zvláštní termo-aktivní prvek.

Bezprostřední okolí systému hraje v chování termodynamických soustav důležitou roli, může výrazným způsobem ovlivňovat vlastnosti prvků, v závislosti na rozdílu teplot okolí a prvků. Můžeme jej v podstatě chápat také jako termo-aktivní prvek, který může být buď pozitivní a nebo negativní, podle toho jestli je teplota okolí vyšší nebo nižší.

Aktivní termodynamické soustavy tedy obsahují nejméně jeden vlastní termo-aktivní prvek a pasivní neobsahují ani jediný vlastní aktivní prvek.

Stav aktivní termodynamické soustavy se ustálí v konečném čase, pokud aktivity všech vlastních i nevlastního termo-aktivního elementu setrvají dlouhodobě na konstantní hodnotě. Ustálený stav aktivní termodynamické soustavy je charakteristický tím, že teploty všech míst soustavy setrvávají na konstantní hodnotě. Tepelný tok skrze plochu libovolně vybraného vnitřního řezu či libovolný výsek hraniční plochy je ustálený, zůstává tedy konstantní.

Celkové teplo směřené skrze libovolně zvolenou vlastní uzavřenou plochu soustavy za libovolně zvolený časový úsek během ustáleného stavu je ekvivalentní prostému součtu aktivit všech prvků uzavřených uvnitř této plochy násobených délkou zvoleného časového úseku.

Ustálený stav aktivní termodynamické soustavy se poruší změnou aktivity libovolného vlastního nebo nevlastního termo-aktivního prvku soustavy.

Stav pasivní termodynamické soustavy se ustálí v konečném čase, pokud teplota jejího bezprostředního okolí dlouhodobě setrvá na konstantní hodnotě. Ustálený stav pasivní soustavy je charakteristický tím, že všechna její místa dosáhnou teploty bezprostředního okolí soustavy a nadále na ní setrvávají.

Pasivní termodynamická soustava v ustáleném stavu nesměňuje uvnitř ani vně žádné teplo, tepelný tok skrz libovolně zvolenou plochu vnitřního řezu či libovolný výsek hraniční plochy soustavy je nulový.

Ustálený stav pasivní termodynamické soustavy se poruší výhradně a jen v důsledku změny teploty jejího bezprostředního okolí.

Historie chování celé soustavy stejně jako libovolného jejího místa je představována řadou ustálených stavů přerušovaných stejně početnou řadou souvislých přechodů mezi dvěma po sobě následujícími z nich.

Integrální součet celkového tepla směřného tepla skrze libovolně zvolenou vlastní uzavřenou plochu soustavy za libovolně zvolený časový úsek během neustáleného stavu a přírůstek akumulovaného na konci vůči začátku téhož časového úseku je ekvivalentní integrálnímu součtu aktivit všech prvků uzavřených uvnitř této plochy za zvolený časový úsek.[3]

3.2 Využití pro termodynamický senzor

Z výše uvedeného vyplývá, že monitorovány jsou výhradně ustálené stavy termodynamických soustav, přičemž v průběhu neustálených stavů může docházet k důležitým jevům, které však zůstanou nepozorovány, neboť získáváme pouze vývojový trend bez patřičných podrobností.

Tento problém se dá odstranit prvkem, který právě umožní monitorování přechodových dějů. Aby takový prvek plně splňoval požadovanou funkci, musí sám neustále setrvávat v rovnovážném stavu. Jeho teplota bude tedy stále konstantní.

Podmínku konstantní teploty může prvek splnit pouze pokud bude schopen kompenzovat vlastní tepelnou interaktivitu s okolím okamžitou dodávkou tepla z vnějšího zdroje.

Proto musí:

- Sám být termo-aktivním prvkem monitorované soustavy
- Sám být trvale udržován v ustáleném stavu, tedy na konstantní teplotě
- Sám termo-interagovat s vlastním bezprostředním okolím monitorované soustavy
- Vlastní tepelnou interakci plně a trvale kompenzovat vlastní termo-aktivitou.

Odtud definice:

Termodynamickým senzorem je každý termo-aktivní prvek termodynamické soustavy udržovaný vlastní poznatelnou termo-aktivitou v trvale rovnovážném stavu, tedy trvale na vlastní konstantní teplotě.

Senzor tedy bude používat pro monitorování teplot vlastní okamžitou termoaktivitu, kterou budeme moci, kterou bude elektricky zastupovat okamžitý spojitý příkon senzoru potřebný k jeho udržení v rovnovážném stavu, tedy na konstantní teplotě.[3]

4 Simulační program Flotherm

Důležitým faktorem, kterým se při návrhu pouzder i dalších součástí musíme zabývat jsou teplotní profily. Teploty okolí, čipu a jejich vzájemná interakce jsou otázkou, kterou kdybychom neřešily, byly by výsledky práce nepoužitelné. Před uvedením součástky na trh je nutnost právě tyto teploty dobře propočítat. To se v současnosti děje nejčastěji prostřednictvím nejrůznějších počítačových simulací.

Jedním z mnoha možných softwarových produktů, které se zabývají teplotními vlivy elektronických součástí, je program Flotherm firmy Flothermics. Flotherm je 3D simulační software pro termální design elektrických komponentů a systémů. Umožňuje vytvořit:

- virtuální modely elektrických zařízení,
- termální analýzy testovaného designu, před vytvořením prototypu.

Flotherm používá pokročilou CFD techniku (Computational Fluid Dynamics- počítačová proměnlivá dynamika) pro předpověď proudění vzduchu, teploty a přenosu tepla v komponentech, deskách a v kompletním systému.

Program je navržen pro široký rozsah elektrických aplikací které zahrnují například počítačové a datové procesy, telekomunikační zařízení a síťové systémy, polovodičové zařízení, integrované obvody a součástky, spotřební elektroniku a další. Program se používá pro úkoly tepelného managementu, jakými jsou řešení tepelných problémů před realizací hardwaru, redukci návrhových přetočení, zvýšení spolehlivosti a celkový strojírenský návrh.[4]

4.1 Tvorba modelu

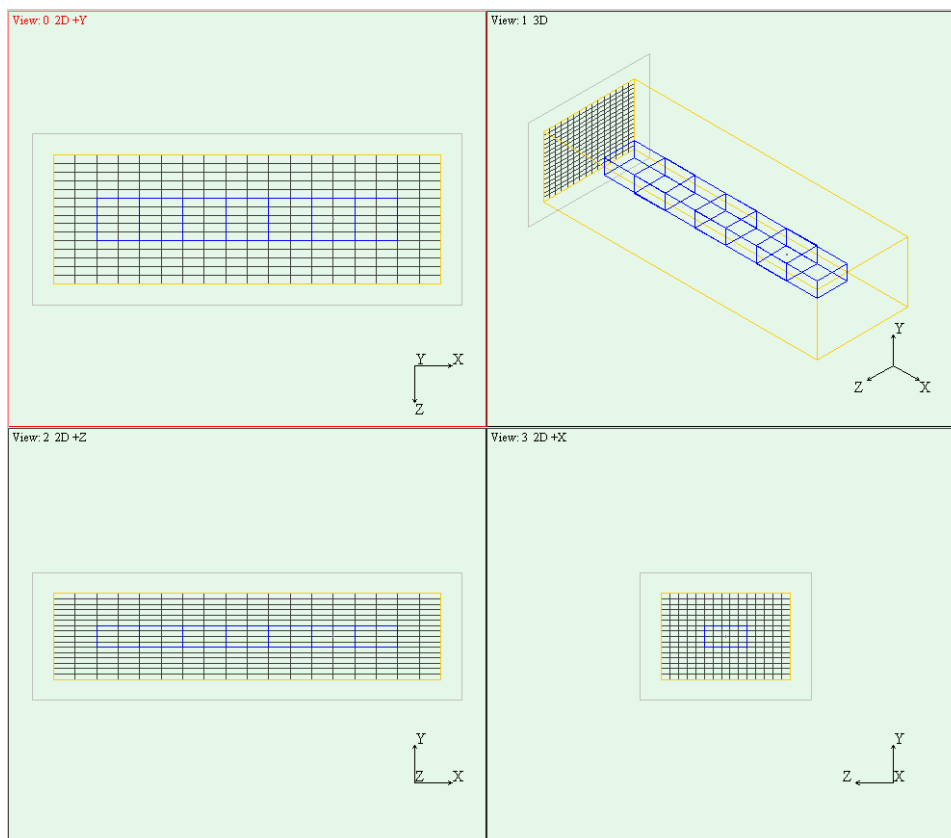
Modely od jednotlivých součástek integrovaných obvodů až po velké množství elektroniky se sestavují velmi rychle z kompletních setů SmartParts (inteligentního modelu vytvořených maker) které jsou dodávány s Flothermem nebo ze www.SmartParts3D.com nebo z dalších mnoha zdrojů po celé zemi, které používají Flotherm. SmartParts zachycují odborné modelování které bylo vyvíjeno v rámci Flomerics 15 let.

4.2 Integrace s MCAD a EDA

Flotherm také obsahuje řešení pro integraci s MCAD a EDA softwary. Původní data z Pro/Engineer, Solidworks, Catia, Allegro a dalších MCAD a EDA softwarů mohou být importovány do Flothermu. Na rozdíl od jiných CAD pro analýzu vnitřních operací, Flotherm automaticky připravuje geometrii pro výkonnou a přesnou analýzu. Díky tomuto dostáváme výsledky daleko rychleji.

4.3 Rozvodná síť

Program využívá pro tvorbu sítě Kartézské struktury. Síť je propojena se SmartParts a je generována jako část shromažďovaných modelových procesů pod kontrolou uživatele. Tato metodologie je intuitivně a přesně zaměřena spíše na návrh, než na analýzu.



Obr. 3: Rozvodná síť v programu Flotherm [4]

4.4 Metoda CFD pro výpočty

4.4.1 Přehled

Výpočetní proces programu Flotherm je založen na technice označované jako CFD (Computational Fluid Dynamics - počítačová proměnlivá dynamika). Tato technika dokáže numerickou simulací řešit tok tekutin, přenos tepla a související procesy jako například radiaci.

4.4.2 Matematická reprezentace

Matematické řešení fenoménu přenosu tepla zahrnuje množství nelineárních, parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu.

Flotherm používá řešení pomocí primitivních proměnných, kterými jsou:

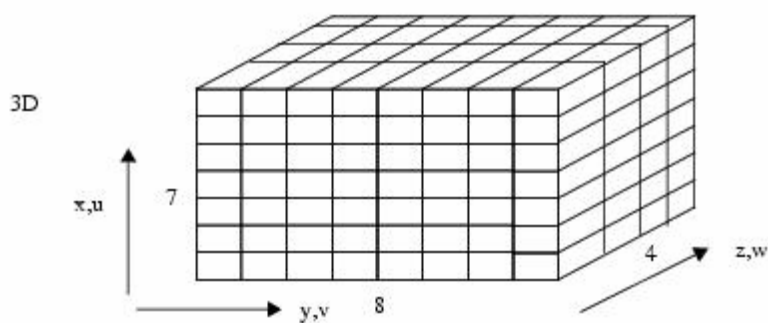
- u, v a w – rychlosti v kartézské soustavě souřadnic x, y a z .
- p – tlak
- T - teplota tekutiny a (nebo) pevného tělesa

Tyto proměnné jsou pak funkcemi souřadnic x, y, z a času.

Diferenciální rovnice, které tyto proměnné řeší se nazývají jako bilanční rovnice. Například u, v a w řeší pohybové bilanční rovnice ve třech směrech souřadnic. Teplota naopak řeší bilanční rovnice termální energie. Tlak se sám o sobě nepovažuje za bilanční rovnici, ale je derivován z rovnice kontinuity, která je v diferenciálním tvaru bilancí celku.

4.4.3 Metoda řešení

V technice CFD jsou bilanční rovnice diskretizovány rozdělením celku na části jednotlivých konečných dílů přes které jsou potom bilanční rovnice vyjádřeny v algebraické formě. Tyto konečné oblasti jsou nazývány jako síťové buňky, kontrolní buňky a nebo zkrátka jen buňky, často se používá také slova mesh. Model rozdělení sítě a rychlostí pro síť má celkově $224 (= 7/8/4)$ buněk jak je ukázáno níže.



Obr. 4: Model rozdělení sítě

Diskretizace výsledků je souhrn algebraických rovnic, každá z nich se týká hodnoty proměnné v buňce a hodnoty její nejbližší sousední buňky.

Například pokud T označuje teplotu, rovnice spojuje T s hodnotami buňky a jejích šesti okolních buněk (označených jako $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$) a její hodnotou v předchozím čase (označeném jako T_0). To můžeme zapsat jako:

$$T = \frac{(C_0 T_0 + C_1 T_1 + C_2 T_2 + C_3 T_3 + C_4 T_4 + C_5 T_5 + C_6 T_6 + S)}{(C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6)} \quad (10)$$

kde C je koeficient spojující hodnotu vstupní buňky s každou sousední
 S reprezentuje vnější vliv (např. zdroj tepla) .

Pokud je celkový počet n buněk v oblasti integrace, je zde n algebraických rovnic k řešení pro každou z pole proměnných T, u, v, w, p , tedy $5n$ rovnic na výpočet. Například pro síť o 50000 buňkách je 250000 rovnic k řešení.

Podle výše uvedeného se může zdát, že rovnice jsou lineární, ale ve skutečnosti je tomu jinak, protože koeficienty (např. C_s) jsou sami funkcemi T, u, v, w a p . Toto zdání linearity je využito následovně: v každé vnější iteraci je koeficient počítán pouze jednou a potom brán jako konstanta, zatímco výsledné rovnice jsou řešeny pomocí vnitřních iterací.

4.4.4 Postup použitého algoritmu

Algoritmus pro řešení můžeme shrnout následujícím příkladem pro 3D simulace proudění a přenosu tepla:

- inicializační tlak, teplota a rychlosti,
- zvýšení vnějších iterací o 1,
- nastavení koeficientů (např. C_s) pro teplotní pole, T ,
- řešení linearizovaných algebraických rovnic pro hodnoty T v každé buňce vytvořením počtu vnitřních iterací.
- opakování předešlých dvou kroků pro pole proměnných u, v a w ,
- řešení rovnic kontinuity podobným způsobem a spojení úprav pro tlak a rychlosti,
- ověření konvergence a popřípadě navýšení vnějších iterací, pokud je třeba.

4.4.5 Definování sítě

Čím kvalitnější síť použijeme (tzn. vyšší počet síťových buněk) tím bližší jsou algebraické rovnice k diferenciálním rovnicím z kterých pocházejí.

Většinou hustější síť používáme v oblastech kde očekáváme největší vzestup proměnných. Ačkoli nezávislost řešení na síti sama o sobě není dostatečná pro zajištění, abychom mohli přesně simulovat co se v realitě děje, (kvůli jiným předpokladům např. přesnost okrajových podmínek, dostatečný model vířivých proudů) mohou být určující faktory považovány za shodné s realitou.

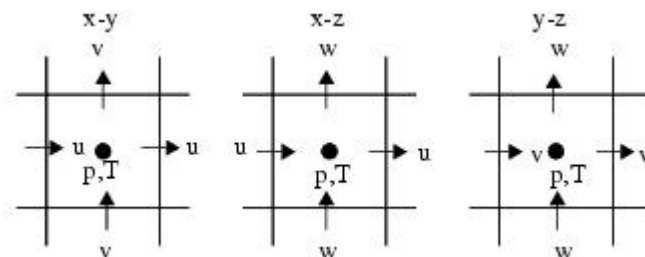
4.4.6 Interpretace výsledků

Skalární pole

Diskretizované hodnoty skalárních polí proměnných jako teplota a tlak jsou umístěny uprostřed dané buňky v síti.

Rovnoměrné uspořádání vektorů

Diskretizované hodnoty rychlostí v komponentech u , v a w jako vektory pole jsou umístěny ve stěnách buňky sítě. Toto uspořádání je schématicky znázorněno v X-Y, X-Z a Y-Z grafech pro jednotlivou buňku.

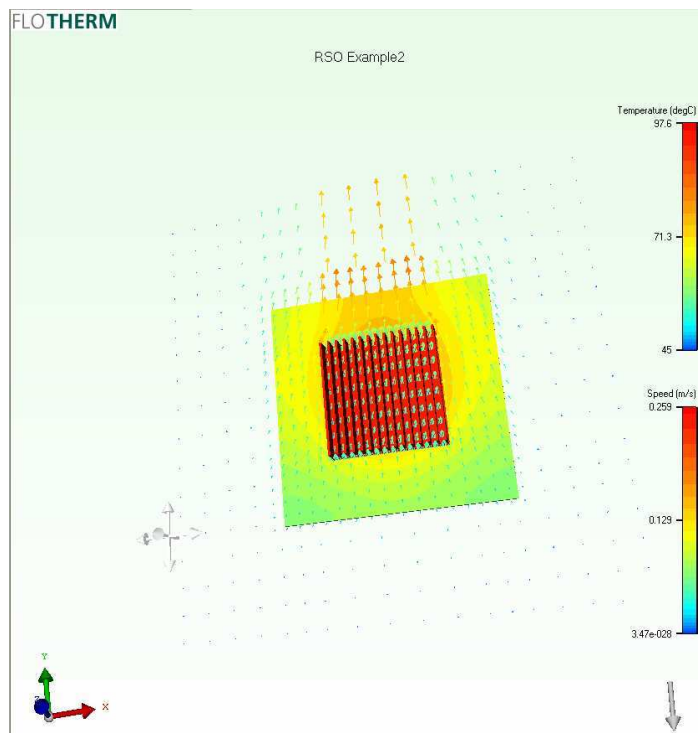


Obr. 5: Uspořádání vektorů v buňce

Při zobrazování výsledků ve Flothermu můžeme zobrazit hodnoty rychlostí ve stěnách buněk, nebo vsunuté do středu buňky.

4.5 Vizualizace

Vizualizace pomocí Flotherm je vyvinuta k maximální produktivitě návrhu chladicí elektroniky. Plně tvořené modely, animace 3D proudění a nástroje pro dynamickou manipulaci teploty, a výsledků proudění, umožňují technikům identifikovat teplotní problémy a pomáhají zlepšit vizualizační návrh. Mapování textur a AVI výstup dává výborné možnosti prezentace výsledků i bez zapínání programu, například pomocí tvorby videa. [5]



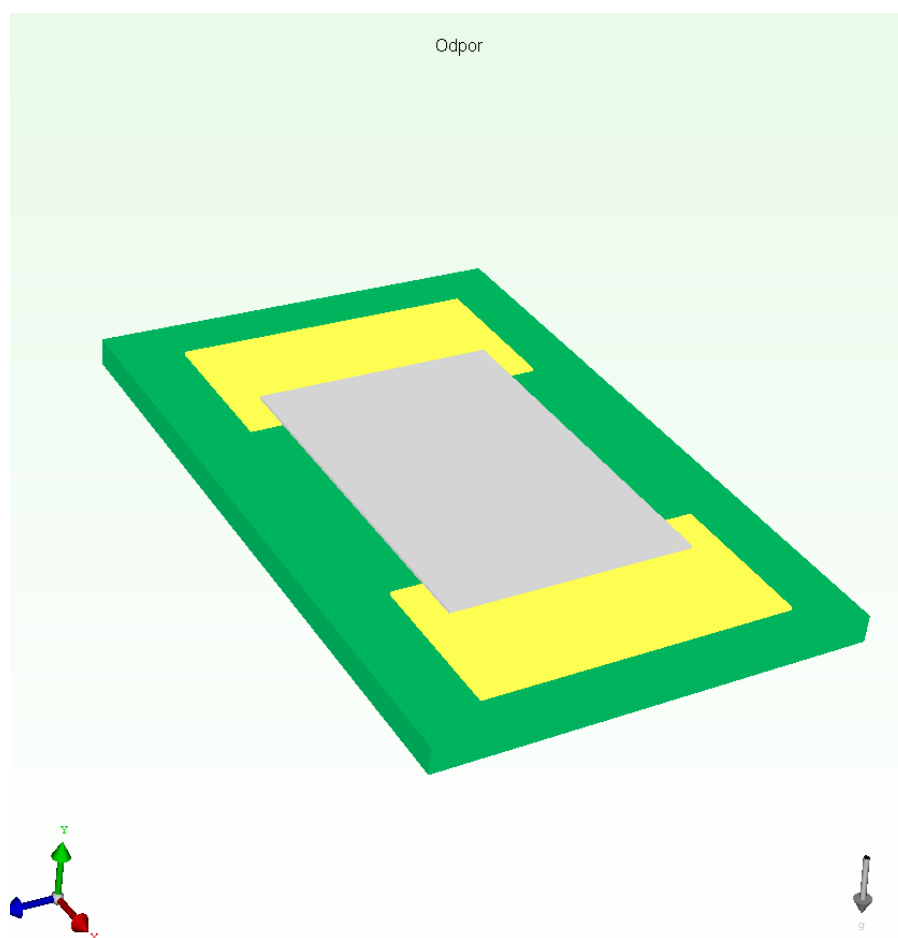
Obr. 6: Ukázka zobrazení výsledků pomocí programu Flotherm [4]

Na obrázku 16. jde vidět geometrie a vypočítané hodnoty ve 3D jak ho program zobrazuje. Můžeme vidět teplotní rozložení na součástce a také přenos tepla, zapříčiněného proudem vzduchu. V pravé části jsou potom stupnice pro upřesnění hodnot. Je zde několik možností pro zobrazení výsledků, od vypočítaných teplot na součástce, nebo tlaku až po pohyb a rychlosti vzduchu pro jednotlivé souřadnice x, y, z.

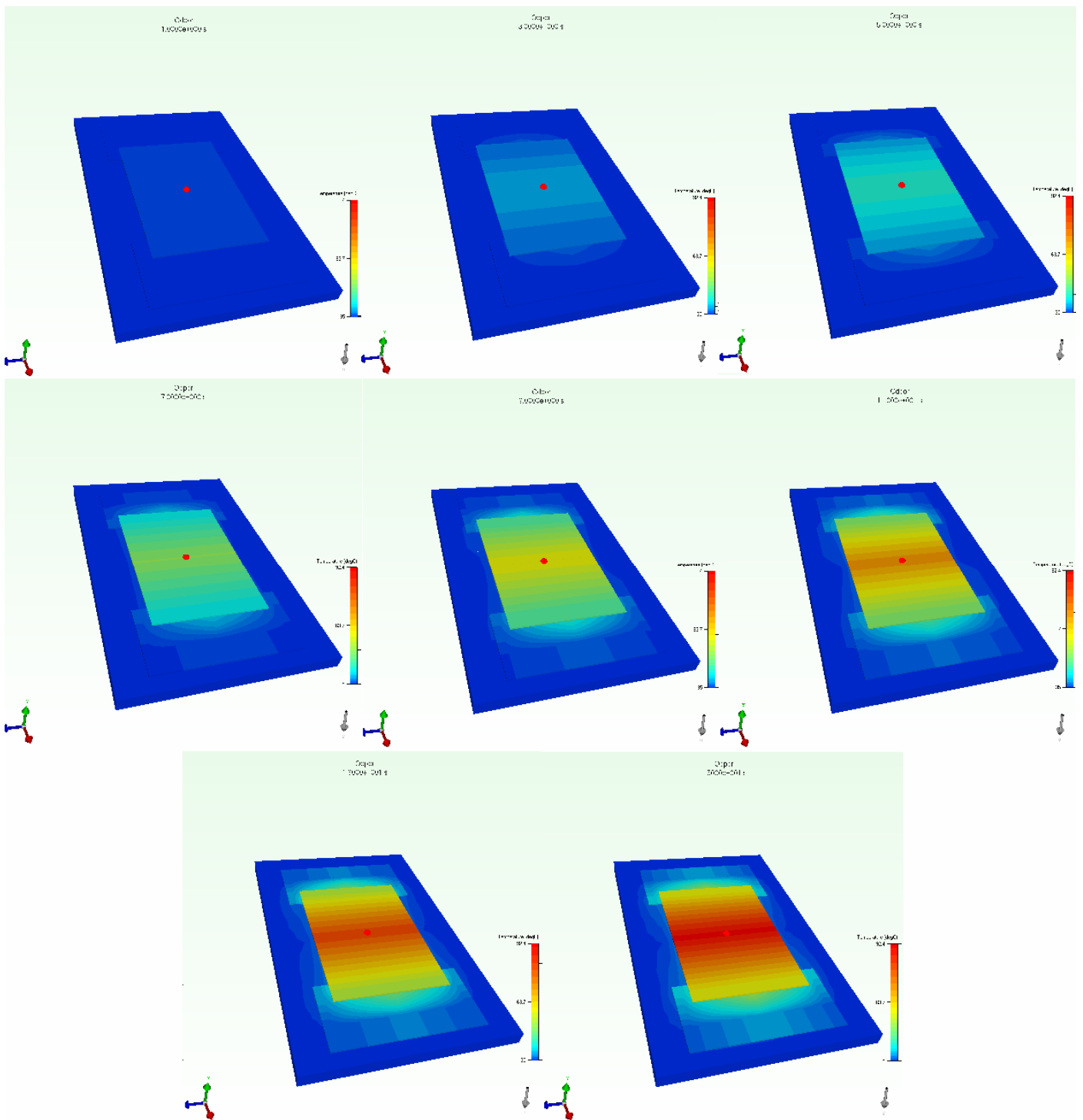
4.6 Použití programu při výuce

Tento program může být skvělým nástrojem pro školské aplikace, kde můžeme sledovat teplotní rozložení na součástce, teplotní ovlivnění okolních prvků a tím předejít špatnému návrhu před tvorbou samotné součástky, či celku. Nebo si simulacemi ověřit některé teoretické znalosti. Také lze zjistit zda dané zařízení bude vhodné pro použití nebo zda je třeba nějaké úpravy, jako zvolení jiných součástí na desce, nastavení jejich hodnot, například výkonu, rozložení, použití chlazení, atd. Také program může simulovat teploty uvnitř součástky, které v podstatě nahrazuje použití termokamery, a nemusíme tedy produkt vyrábět.

Názorný příklad použití lze vidět na obrázku 7. Je zde pomocí programu realizován model odporu, jehož rozložení teplot při postupném zvyšování proudu je na obrázku 8. Můžeme pozorovat rozložení tepla na odporu a také tepelný přenos na kontakty a na substrát.



Obr. 7: Rozložení teploty na odporu



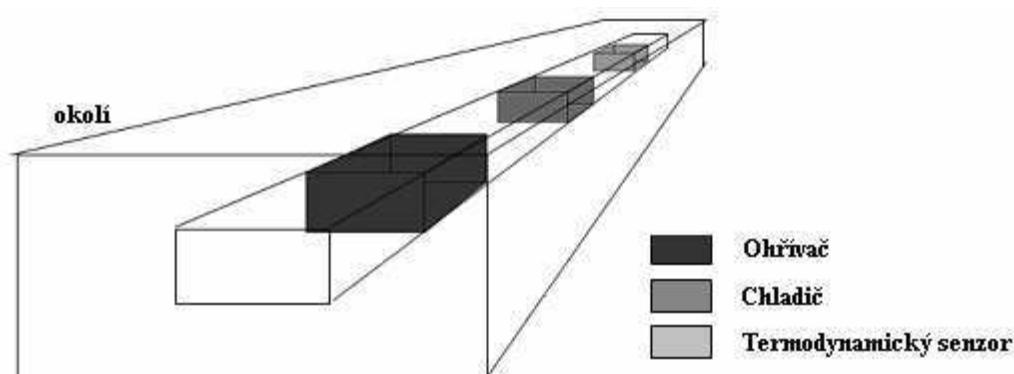
Obr. 8: Rozložení teploty na odporu

5 Experimentální část

5.1 Teplotní prvek

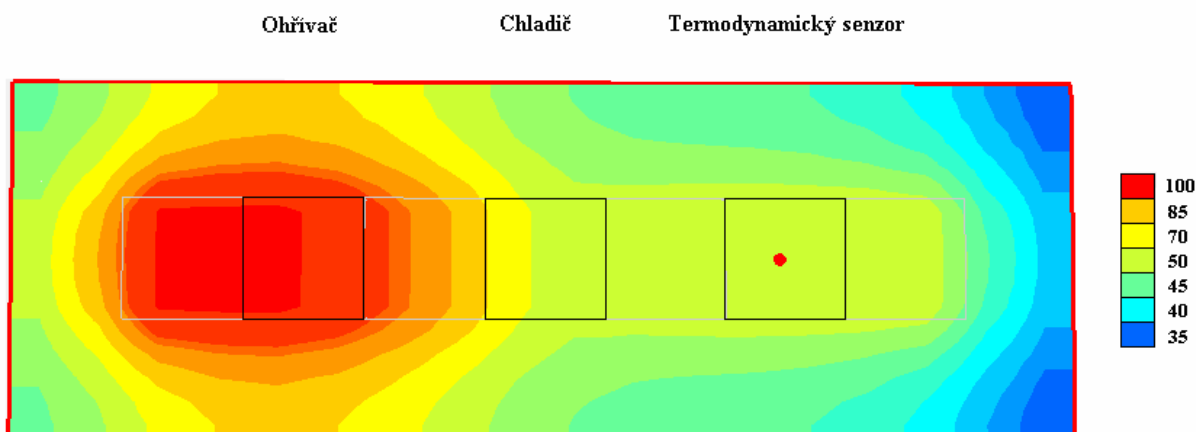
Základní úlohou v řadě teplotně zkoumaných objektů je snaha vytvořit teplotní model termodynamického prvku jako součásti elektronického systému. Předpokládáme, že takový elementární prvek si neustále musí zachovávat konstantní teplotu, například pro náš případ zvolíme 50°C . Jako teplotní prvek si můžeme představit například senzor. Ten by měl tuto teplotu regulovat pomocí svého výkonu. Pokud by teplota zůstávala konstantní teplotní prvek by si zachovával výkon takový, který by udržoval jeho teplotu právě 50°C , při změně prostředí by prvek automaticky změnil svůj výkon tak, aby jeho teplota zůstala stejná. To znamená, že při zvýšení teploty by senzor svůj výkon zmenšil, tím pádem by bez vlivu okolí měla jeho teplota klesnout, ale právě při součtu vlivu okolí zůstane teplota senzoru stálá. Při snížení teploty senzor naopak svůj výkon zvýší a jeho teplota opět zůstane konstantní.

Pro počáteční simulaci jsme si zvolili model, který obsahuje tři prvky, které jsou umístěny na desce. Nejdůležitějším prvkem je termodynamický senzor (TDS), ten ovlivňuje další dva prvky systému, a to topidlo (Heater) a chladič zařízení (Cooler). Uspořádání systému je zobrazeno na Obrázku 9. Pro jednoduchost jsme všechny prvky uvažovali ze stejného materiálu, kterým je keramika Aluminium 96%.



Obr. 9: Schématický model pro virtuální simulaci

Teplota okolí byla zvolena 36°C, jako výchozí stav je uvažováno, že všechny prvky jsou vypnuté, tzn. že není vyzařováno žádné teplo. V dalších simulacích jsme volili různé kombinace zapnutí respektive vypnutí topidla a chladicího zařízení. Posledním řešením bylo nastavení obou prvků a navíc přidělení TDS konstantní teploty 50°C. Při těchto simulacích jsme si chtěli ověřit rozložení teplot v tomto modelu. Řešení posledně zmíněného nastavení je vidět na obrázku 10.

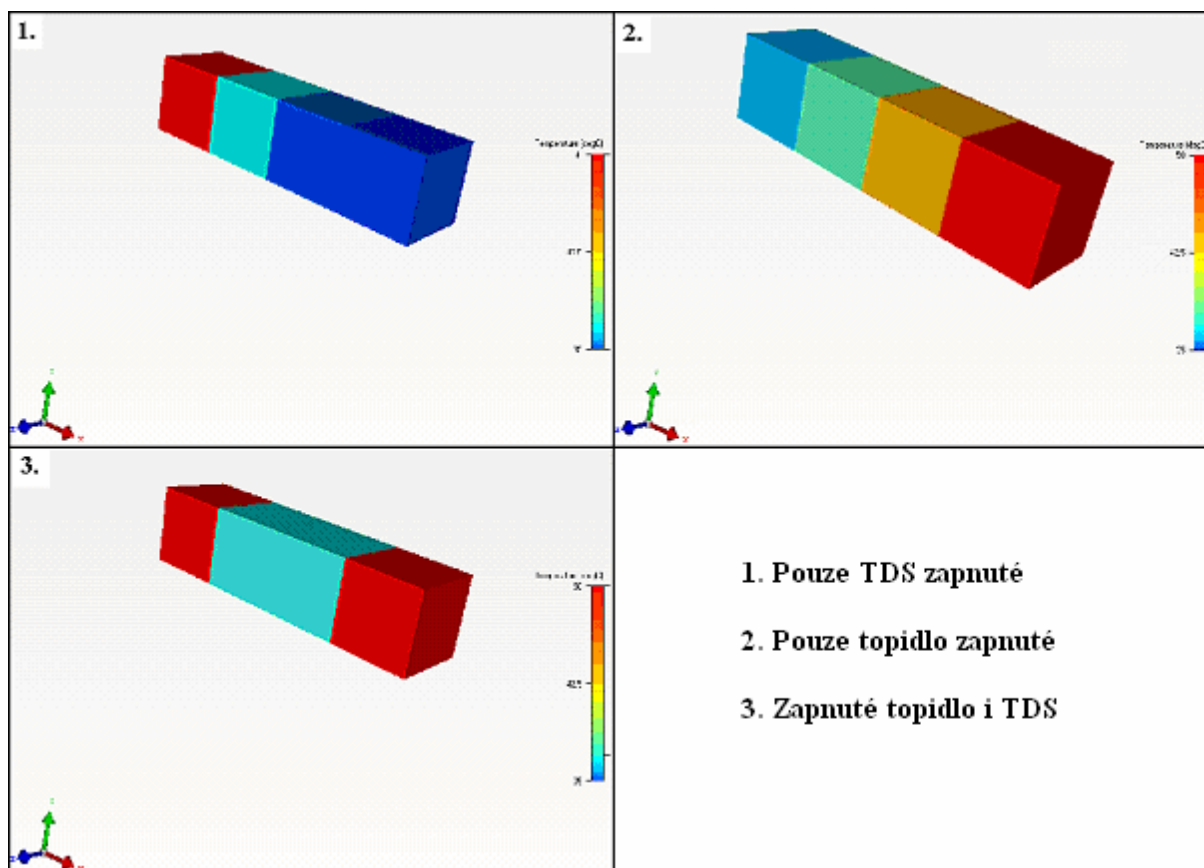


Obr. 10: Teplotní ovlivnění prvků

5.2 Simulace

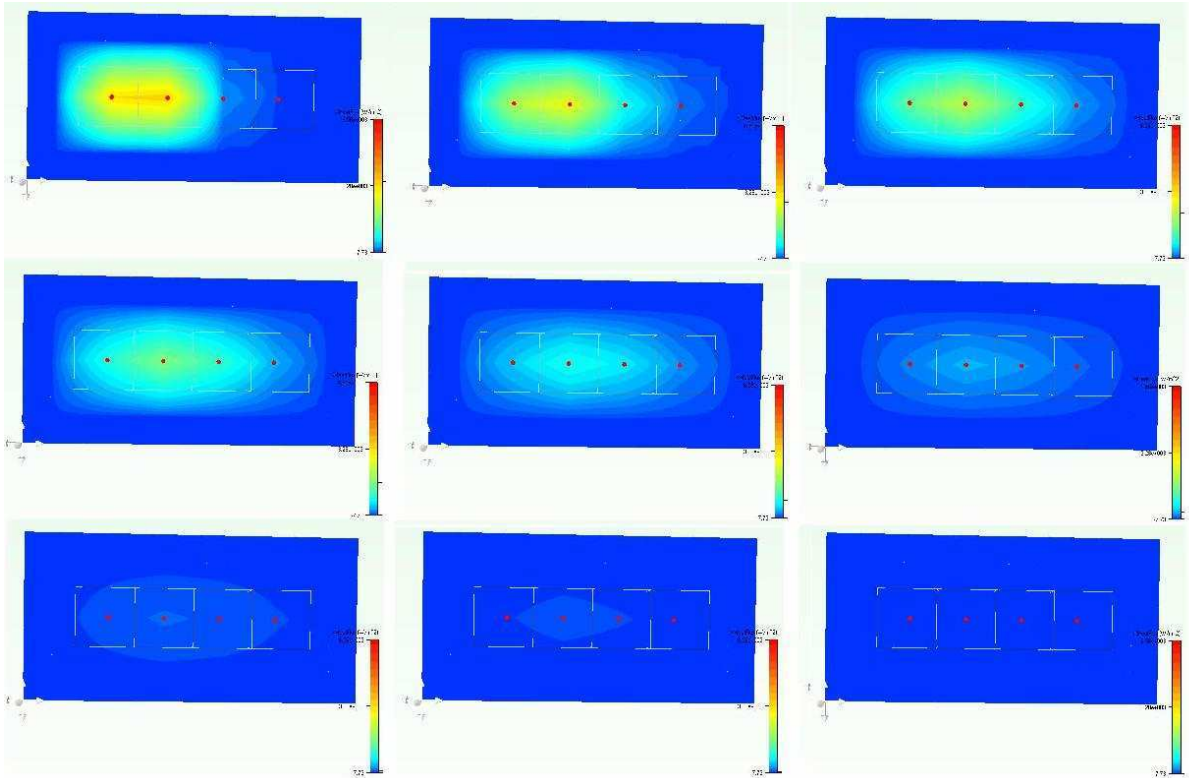
Jak již bylo zmíněno v úvodu, monitorování teploty je lepší provádět zprostředkovaně, pomocí změny aktivity některého z prvků, a nikoli jen jako hledání teplot pro jednotlivá místa soustavy v daný čas. Pro tento způsob monitorování by měl právě sloužit termodynamický senzor, nejdříve jsme však museli najít vhodný simulační model. Zjistili jsme, že předchozí model, obsahující topidlo i chladicí zařízení, můžeme zjednodušit sjednocením těchto dvou prvků, neboť zatím předpokládáme pouze jednostrannou změnu teploty. To znamená, že se bude okolí senzoru buď oteplovat a nebo ochlazovat, tudíž stačí jeden prvek, který by simuloval obě dvě tyto situace.

Před samotnými simulacemi teplotního prvku jsme na modelu museli ověřit základní chování termodynamické soustavy. Pro tento účel jsme využili modelů, které jsou zobrazeny na obrázku 11. Simulovali jsme tři situace pro ověření správnosti funkce modelu, první variantou bylo pouze zapnutí TDS, druhou pouze topidla a třetí varianta představovala zapnuté oba dva tyto prvky.



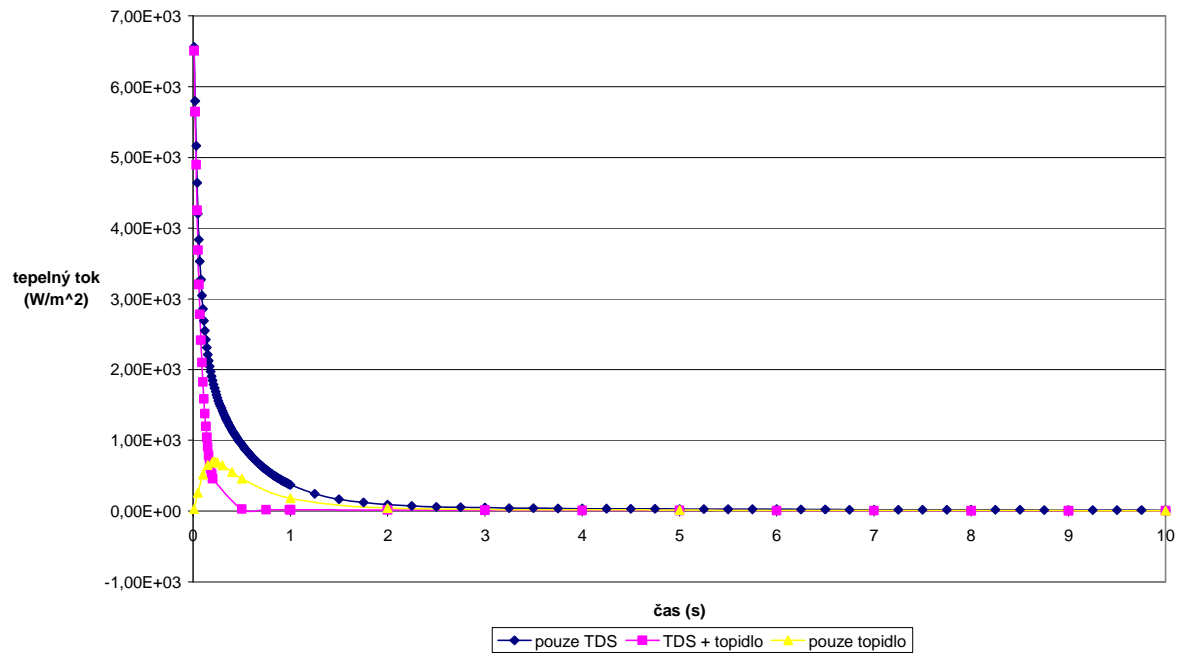
Obr. 11: Modely pro simulaci

Pro lepší představu o rozložení toku tepla v modelu slouží obrázek 12, zde je vidět přenos tepla soustavou během času při nastaveném TDS na 50°C. Výsledné grafy tepelného toku v modelech je potom vidět na obrázku 13. Jde o změnu aktivity TDS v závislosti na čase, z tohoto pohledu nás nejvíce zajímá žlutá křivka (pouze topidlo), kdy jde vlastně o reakci na vnější podnět, v tomto případě na aktivitu topidla. Abychom tedy simulovali funkci termodynamického senzoru je třeba zajistit patřičnou odezvu na daný podnět. Nestačí však vzít hodnoty, které dostaneme po podobné simulaci jako ukazuje obrázek 13, a pouze zajistit pomocí výkonu senzoru aby byli ve výsledku nulové, musíme měnit hodnotu výkonu TDS v každém kroku simulace, neboť při každé takové změně se také mění tepelný tok v celé soustavě.



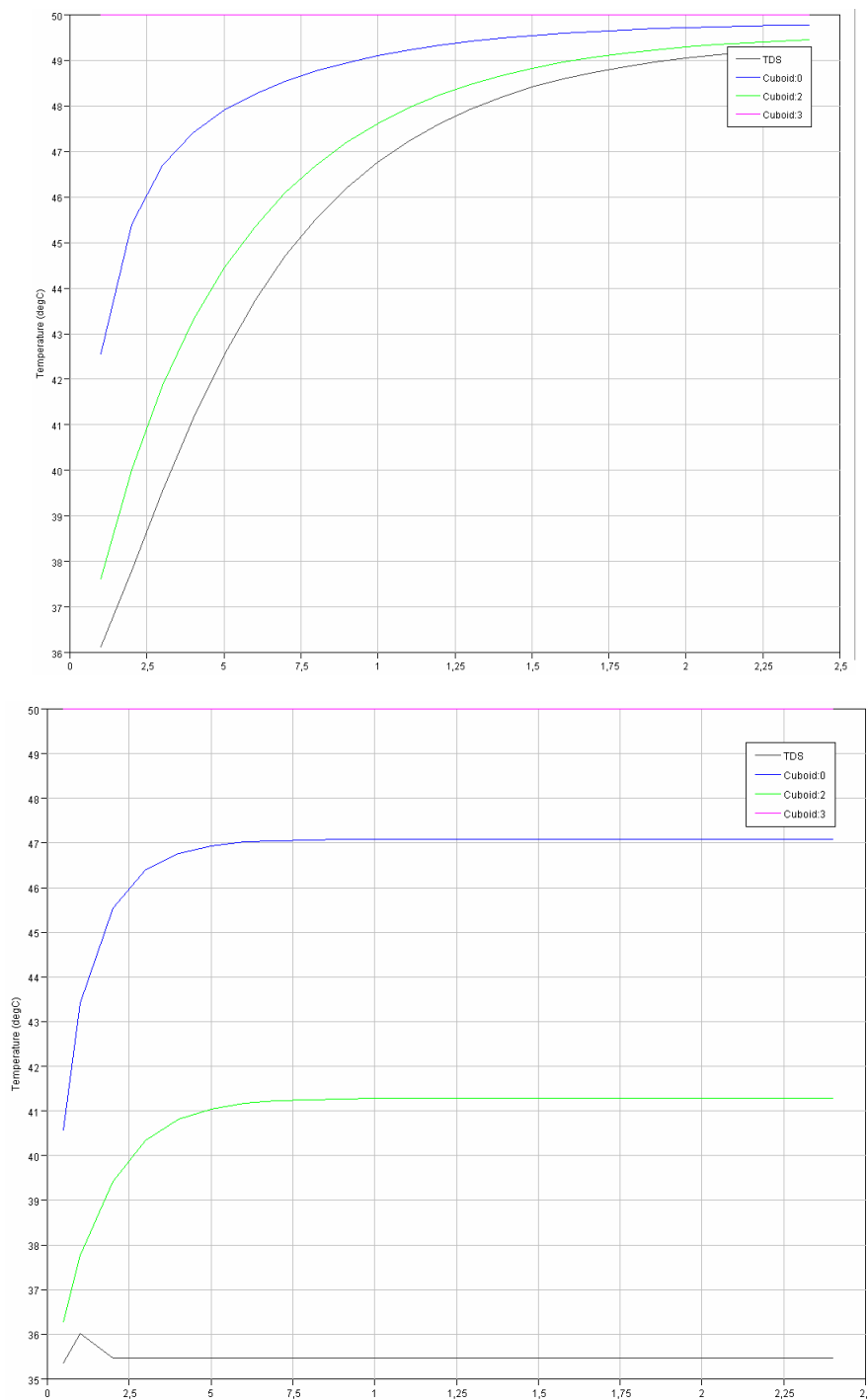
Obr. 12: Rozložení tepelných toků při zapnutém TDS

Graf závislosti přenosu tepla na čase



Obr. 13: Graf tepelných toků pro jednotlivé modely

Na obrázku číslo 14. je vidět přímo funkce termodynamického senzoru, na vrchním obrázku je situace, kdy je senzor vypnutý (nedodáváme mu žádný výkon) tudíž reaguje na aktivitu okolního prvku a začíná pomalu vyrovnávat svou teplotu na teplotu aktivního prvku. Na spodním obrázku je situace, kdy je termodynamický senzor aktivní, po dodání určitého výkonu se stabilizuje na definované hodnotě (zde 35,5°C) a pomocí svého výkonu si tuto teplotu nadále udržuje.

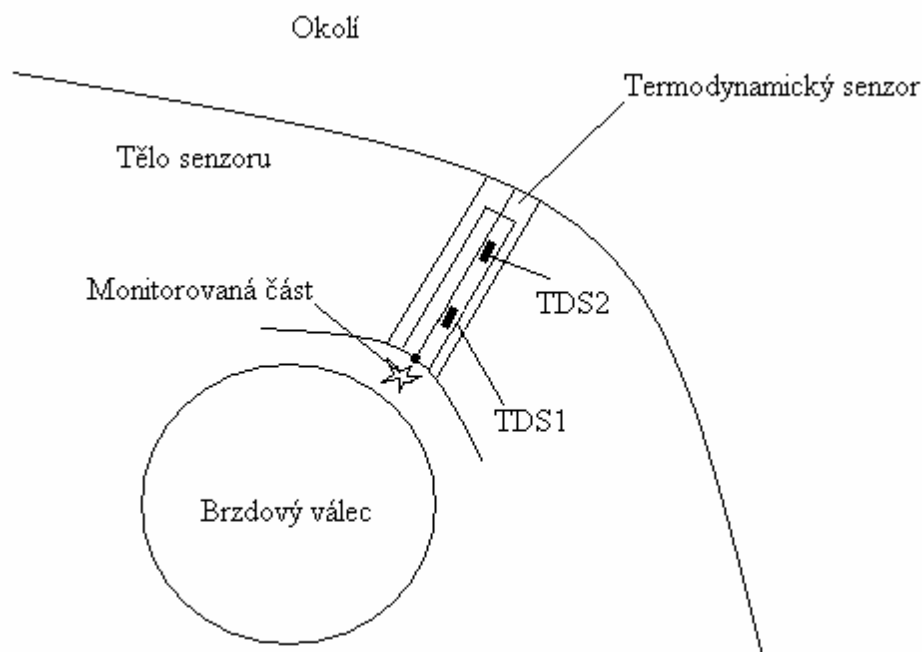


Obr. 14: Grafy rozložení teplot TDS (nahoře při vypném stavu, dole zapnutý TDS)

5.3 Praktická aplikace senzoru

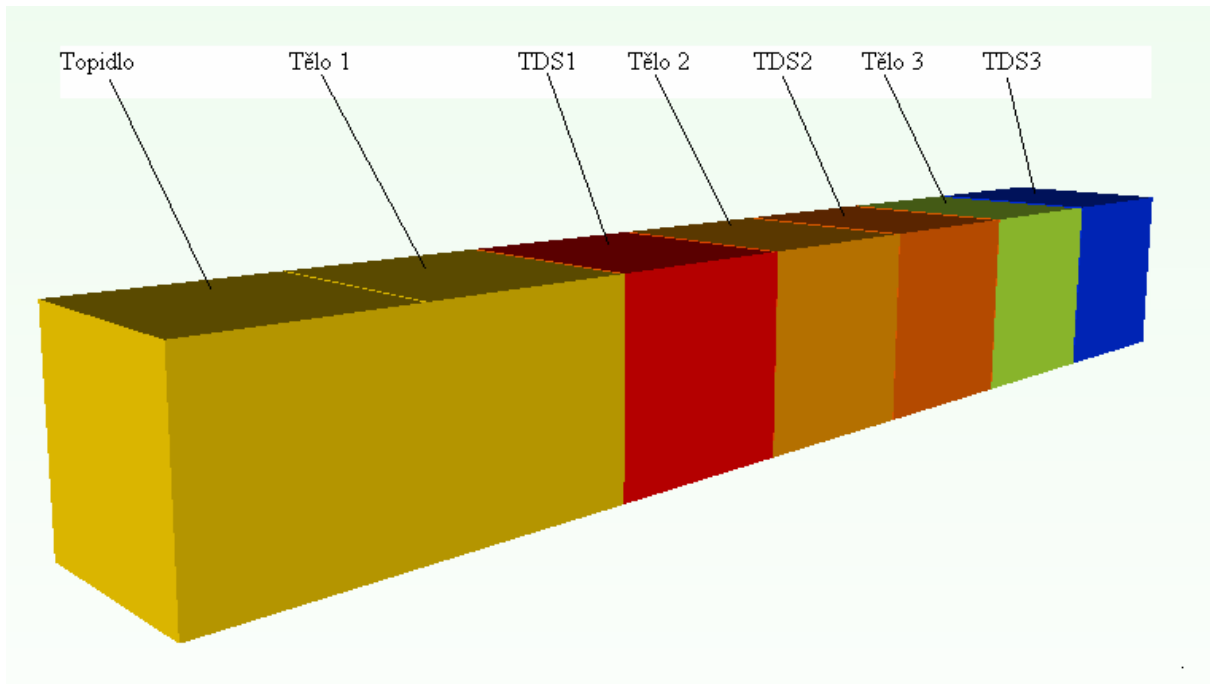
Tato simulace ještě nemůže být konečným řešením, neboť lze vidět, že termodynamický senzor svým chováním značně ovlivňuje okolní prvky. Aby se tomuto zabránilo a monitorování bylo přesnější volí se vždy teplota senzoru vyšší než je teplota blízkého okolí.

Toto opatření jsme zavedli pro konečnou simulaci. Jde již o praktickou aplikaci senzoru, kdy model představuje monitorovací systém brzdového válce, názorná ukázka je na obrázku 15. V celém termodynamickém senzoru jsou použity tři teplotní prvky, dva slouží jako termodynamický štít a poslední pak již přímo snímá potřebnou veličinu. Zde jde o náhlé teplotní změny brzdového válce. Tyto výkyvy mohou odpovídat nadměrnému přehřívání brzd.



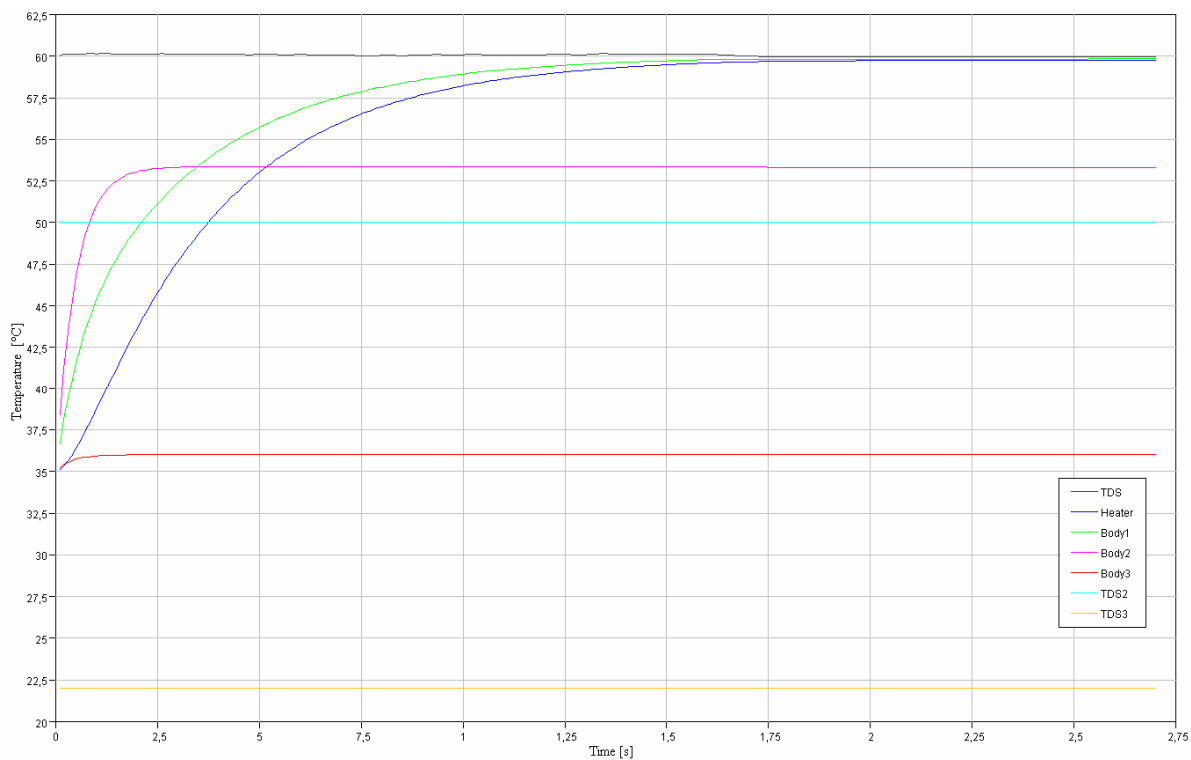
Obr. 15: Ukázka možného použití termodynamického senzoru

Pro toto použití senzoru jsme vytvořili model, který je vidět na obrázku 16. Zde nám topidlo nahrazuje monitorovanou oblast u brzdového válce. TDS2 a TDS3 potom slouží jako termodynamický štít, kdy TDS3 je nastaven na stálou teplotu okolí (přibližně 22°C) a TDS2 nám odstraňuje zbylé teplotní jevy, které by mohly negativně ovlivnit monitorování senzoru TDS1. Oblasti označené jako „těla“ potom slouží jako modely materiálu ve kterém jsou senzory uchyceny.



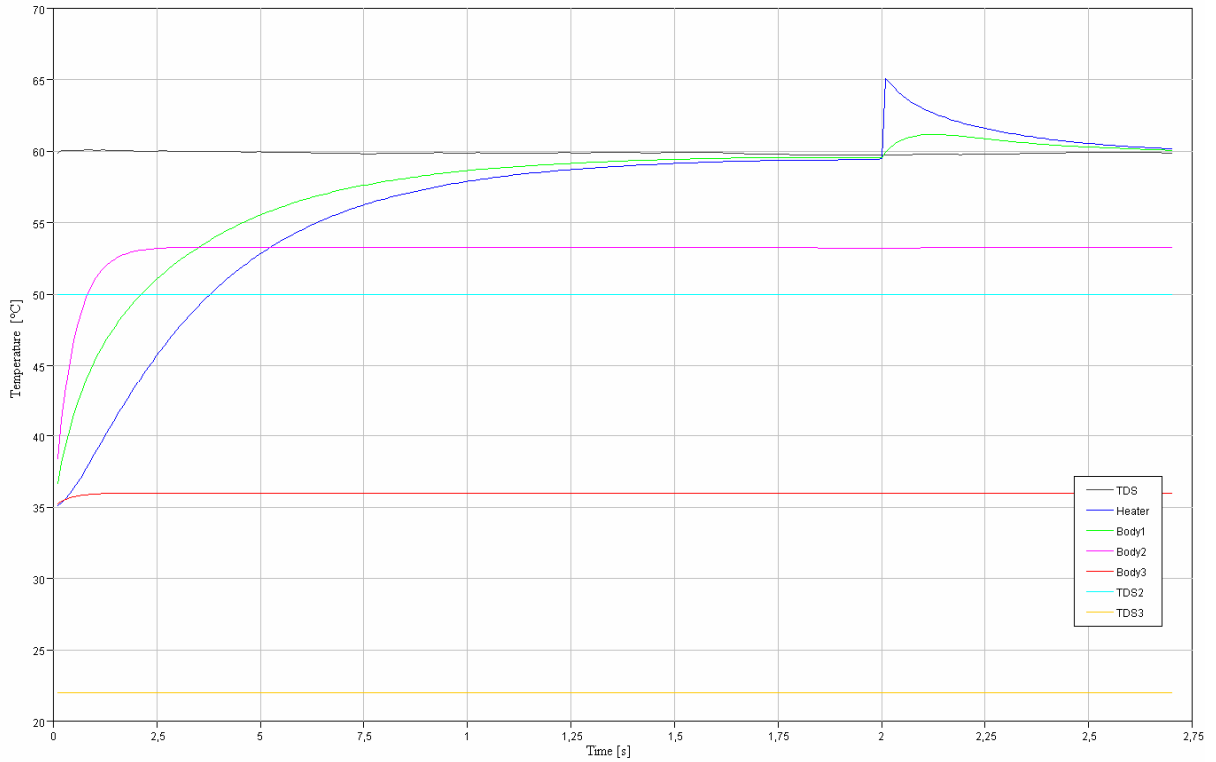
Obr. 16: Model pro simulaci TDS jako brzdového senzoru

TDS1 je nastaven na 60°C, jak se soustava chová a jak se teploty prvků vyrovnají je vidět na obrázku 17. Na tomto obrázku je vidět popsany systém v klidu, kdy nedochází k žádnému teplotnímu výkyvu.



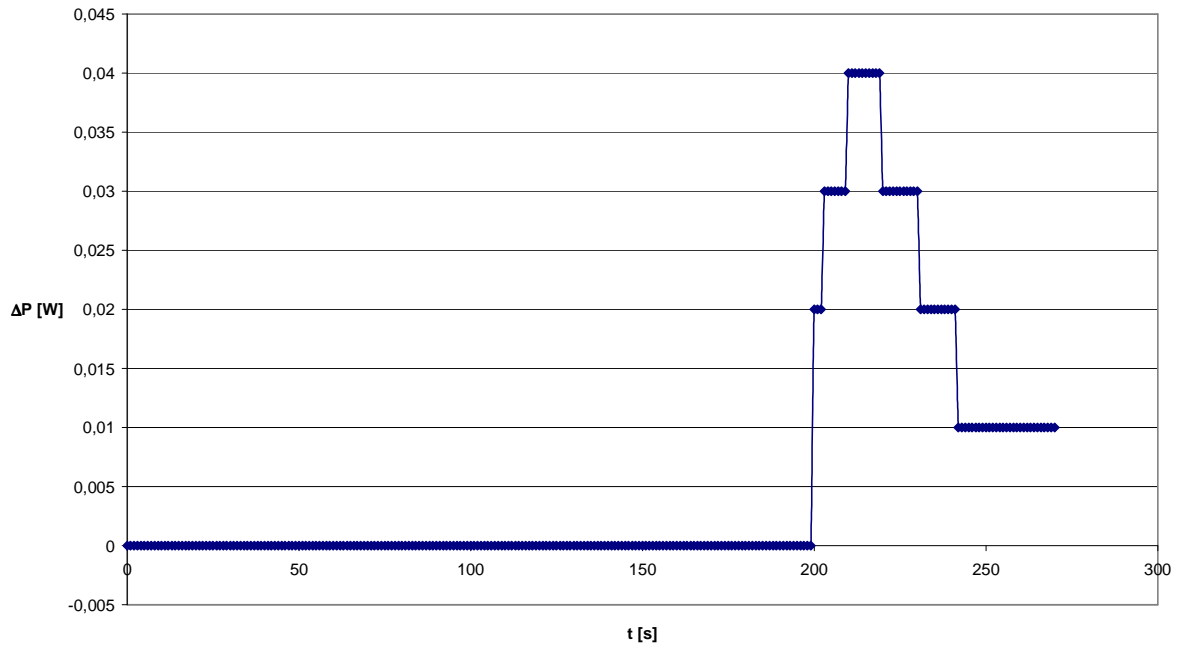
Obr. 17: Graf pro model TDS jako brzdového senzoru

V dalším grafu, obrázek 18, je pak vidět tepelná změna topidla (modrá křivka). Lze odečíst výrazný nárůst teploty v čase 2,1 s. Teplotní senzor však tento podmět zachytil a uchoval svoji teplotu na 60°C. Rozdíl dodaného výkonu TDS pro situace zobrazené grafy na obrázku 17, respektive 18, lze vidět na Obr. 19.



Obr. 18: Graf pro simulaci brzdového senzoru

Graf rozdílu výkonu TDS



Obr. 19: Graf rozdílu výkonu TDS

Z tohoto grafu lze jasně vidět jak senzor změnil svůj výkon v návaznosti na změnu tepelného působení topidla. Také lze odečíst, že největší rozdíly výkonu pro klidový stav a stav působení topidla jsou v rozmezí 2,1 a 2,4 s, přičemž největší změna je v čase asi 2,2 s. To je tedy přibližně 0,1 s po změně teploty topidla. Tyto časové údaje však nejsou zcela přesné, slouží však k pochopení principu. Tedy že je potřeba brát v úvahu zpoždění dané prostupem tepla materiálem, toto zpoždění je pak dáno vzdáleností senzoru od monitorované oblasti a materiálem, který se v této oblasti nachází. Není ovšem problém tento nedostatek odstranit jednoduchou simulací, ze které můžeme potřebná data odečíst a následně je aplikovat.

V takové aplikaci by nakonec mohl termodynamický senzor pracovat nejen jako snímač okamžitého zatížení brzdové čelisti, ale současně jako snímač provozní tloušťky jednotlivé brzdové destičky (tedy jejího opotřebení), byl-li by senzorem vybaven každý držák destičky, šlo by navrhnout zařízení pro dynamickou provozní kontrolu souběhu (účinnosti) mezi koly a nápravami navzájem. Takový systém by dokázal opravdu včas a za provozu diagnostikovat veškeré známé rizikové stavy brzdových systémů, včas signalizovat požadavek na servis a tak přispět k bezpečnosti provozu.

6 Závěr

Byl vytvořen simulační model teplotního prvku, který si neustále udržuje konstantní teplotu díky svému výkonu. Díky tomuto můžeme kontinuálně monitorovat teplotu v jakémkoli termodynamickém systému s velmi přesnou výkonovou citlivostí, což zatím žádný jiný prvek nedokázal. V práci je již také nastíněn příklad přímé aplikace senzoru. Jde však pouze o jednu z mála možných realizací, neboť potenciál senzoru, který kontinuálně monitoruje systém jak v ustálených, tak neustálených stavech, je velký. Simulační model, jež byl vytvořen, lze dále jednoduše upravovat pro potřebné aplikace, přesto by ještě bylo vhodné zvětšit rozvodnou síť, abychom dostávali přesnější výsledky. Zatím byla použita velice hrubá síť a tudíž byl prostup tepla velice rychlý a lišil se od skutečných hodnot. Touto úpravou bychom se potom mohli již přiblížit k reálným hodnotám velice blízko. Také je třeba optimalizovat model z hlediska teplotního ovlivnění, neboť při pohledu na grafy je zřejmé jak TDS ovlivňuje okolní prvky a může dojít k nepřesnému vyhodnocení. Tento jev by se dal ošetřit správně nastavenou teplotou senzoru, kterou by si uchovával. Tato by měla být zvolena tak, aby odpovídala teplotě snímaného prvku v klidovém stavu, přičemž však maximální možná teplota senzoru, které by byl schopen dosáhnout díky svému výkonu, by měla být nepoměrně vyšší. Ta potom zároveň s minimální možnou teplotou by udávala v podstatě pracovní rozsah senzoru. Jde však pouze o správnost nastavení parametrů senzoru.

Jak bylo zmíněno, na dosažené výsledky bude dále navazovat další optimalizace simulačního modelu na základě poznatků získaných z praktických měření. Zde budou využity rovněž výsledky získané z měření pomocí termokamery. Již teď je ale zřejmé, že při ověření správnosti nastavení může tento model sloužit jako velice účinný nástroj nejen pro realizaci samotného senzoru, ale také pro zobrazení možností jeho použití v praktických aplikacích.

7 Použitá literatura a zdroje:

- [1] Termovize - Termografie - Termografické měření [cit. 2008-01-14]. Dostupné z WWW: <http://www.termovize.com/teorie.html>

- [2] Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů. Brno: VUTIUM, 2006. 377 s.

- [3] Řezníček, Z. St, Szendiuch, I., Řezníček M., Tvarožek V., Řezníček Z. Ml.: Thick Film Sensor for Temperature Balanced Process Monitoring, Proceedings 40th IMAPS USA Symposium, San Jose, 2006.

- [4] FLOTHERM, Simulation Software for Electronics Cooling, Thermal Design and Analysis [cit. 2008-02-01]. Dostupné z WWW: <http://www.flomerics.com/products/flotherm/about.php>