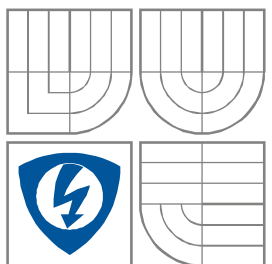


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TERMODYNAMICKÉ SENZORY NA PRINCIPU BILANČNÍ ROVNOVÁHY

THERMODYNAMIC SENSORS BASED ON THE PRINCIPLE OF BALANCE EQUILIBRIUM

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MICHAL ŘEZNÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO, 2014

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou monitorování výskytu a průběhu minoritních událostí v termodynamických soustavách pomocí termodynamických senzorů založených na principu bilanční rovnováhy.

Základem této práce je nalezení nového uspořádání senzorů termodynamického snímače, které umožňuje práci v širokém rozsahu pracovních zatížení sledované soustavy při současném zachování potřebné citlivosti.

Nově navržené bilanční zapojení pro snímač v uspořádání se čtyřmi senzory umožňuje aktivní nastavení výchozí bilanční rovnováhy a výkonové přizpůsobení senzoru jeho bezprostřednímu okolí v soustavě.

Návrhem a optimalizací bilančního zapojení bylo možné docílit měření výstupní odezvy bilančního zapojení a jejího převodu na číselnou podobu. Tím byla umožněna její číselná analýza, algoritmické zpracování výsledků a generování zpětnovazebního řídicího signálu pro úpravu podmínek rovnováhy.

Klíčová slova

Termodynamická soustava, teplota, energie, měření aktivity, minoritní aktivita, majoritní aktivita, senzor, simulace, bilanční rovnováha.

Abstract

This paper deals with the problem of monitoring the occurrence of the minority events in thermodynamic systems by using thermodynamic sensors based on the principle of balance equilibrium.

The basis of this work is to find new sensor arrangement of thermodynamic sensors that allows work in a wide range of workloads of monitored system while maintaining the required sensitivity.

Newly designed balance circuit for the sensor arrangement with four active sensors allows active setup of the default balance equilibrium and power matching of the sensor to its immediate surroundings in the system.

By designing and optimization of balance circuit was achieved measuring the output response and its conversion to digital format. This enabled numerical analysis of output signal, algorithmic processing of the results and generate a feedback control signal to adjust the equilibrium conditions.

Keywords

Thermodynamic system, temperature, energy, activity measurement, minor activity, major activity, sensor, simulation, balance equilibrium.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma Termodynamické senzory na principu bilanční rovnováhy jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační 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. října 2014

_____ autor práce

Bibliografická citace

ŘEZNÍČEK, M. Termodynamické senzory na principu bilanční rovnováhy. Disertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 93 stran, 5 příloh. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Obsah

Obsah	3
1 Úvod	4
2 Současný stav a vymezení oblasti disertace	6
2.1 Monitorování termodynamických soustav	6
2.1.1 Monitorování pomocí soustavy teplotních snímačů	6
2.1.2 Monitorování pomocí termodynamických snímačů	7
2.1.3 Srovnání způsobů monitorování, aplikační omezení	12
2.2 Specifikace cílů disertační práce	13
3 Výsledky disertace	14
3.1 Nové uspořádání termodynamických snímačů	14
3.1.1 Zapojení a podmínky stability	15
3.1.2 Přínosy řešení dílčího cíle 1	19
3.2 Rozšíření bilančního zapojení	20
3.2.1 Aktivní nastavení výchozí bilanční rovnováhy	20
3.2.2 Výkonové přizpůsobení reálné soustavě	21
3.2.3 Přínosy řešení dílčího cíle 2	22
3.3 Automatické přizpůsobení provozním podmínkám	23
3.3.1 Přínosy řešení dílčího cíle 3	25
4 Závěr	25
5 Literatura	28
6 Vlastní publikace	28
Curriculum Vitae	30

1 Úvod

Tato disertační práce se zabývá termodynamickými senzory na principu bilanční rovnováhy jako prostředku k monitorování výskytu a průběhu minoritních událostí v termodynamických soustavách. Pod pojmem minoritní událost chápeme rozsahem velmi malou místní změnu stavu prvku soustavy nebo jeho aktivity. Naproti tomu majoritní událost je svým rozsahem velká změna stavu soustavy nebo jejích aktivit.

Mimo majoritních událostí souvisejících s plněním žádaných funkcí termodynamické soustavy se čím dál více vyskytuje potřeba monitorování minoritních událostí, a to především z následujících důvodů:

- a) I porucha malé komponenty rozsáhlé termodynamické soustavy může způsobit její nefunkčnost.
- b) Neustále rostoucí nároky na spolehlivost a jakost cílových produktů vedou ke zmenšování technologického okna daných procesů. Tím se často zvyšují nároky na jejich regulaci, řízení a kontrolu až na samotnou mez možností při využití současných technologií. Proto roste význam a potřeba monitorování minoritních událostí, které v rámci celého procesu nabývají na významu. Identifikace a kvalifikace minoritních událostí na pozadí žádaných majoritních funkcí soustav je však klasickými metodami technicky a investičně velmi náročná, a v mnohých případech nerealizovatelná.
- c) Mimo výše uvedených očekávaných nežádoucích událostí roste také význam možnosti odhalení výskytu neočekávaných nežádoucích událostí, jako je tomu například v období uvádění rozsáhlejších technologických celků do provozu.

Monitorování minoritních událostí klasickými metodami zavedenými k monitorování majoritních událostí je omezeno zejména požadavky na široký rozsah provozních podmínek, v nichž má soustava plnit zadané funkce. [1][2][3] Těmi je zejména velký rozsah teplot okolního prostředí, velká tepelná kapacita soustavy zpomalující odezvu, dlouhodobá stabilita vlastních snímačů teploty a potřeba jejich pravidelného metrologického ověřování. Z výše uvedených skutečností lze omezení definovat následovně:

- a) Hlavním požadavkem je plnění základních funkcí termodynamické soustavy v širokém rozsahu teplot okolí, což u lineárních převodníků teploty omezuje dosažitelnou citlivost určení teplot v jednotlivých místech zatížené soustavy. Přitom rozdíly teplot vyvolané normálním pracovním zatížením soustavy zůstávají naopak relativně stálé. Klasickými postupy jsou proto minoritní události na majoritním pozadí jen stěží identifikovatelné.
- b) Dosažitelná rychlost odezvy má vliv na včasnou identifikaci místních odchylek v soustavě od požadovaného stavu. Čím hmotnější taková soustava bude, tím více energie se v ní akumuluje a tím pomalejší je poté i rychlost odezvy.
- c) Dlouhodobá stabilita má zásadní vliv na zachování přesnosti určení teploty v každém monitorovaném místě soustavy. Každá nesouhlasná změna vlastností použitých snímačů s postupujícím časem zvětšuje neurčenost malých teplotních rozdílů ve vybraných místech soustavy.

- d) Problém nastíněný v předchozím bodě je řešitelný pravidelným metrologickým ověřováním použitých snímačů, které ovšem nelze provádět bez jejich demontáže a ověření v laboratoři.

Obecně je identifikace a kvalifikace minoritních událostí omezena absolutní nepřesností jednotlivých teplotních snímačů. S rostoucím požadavkem na kvalifikované určení stále menších a menších rozdílů teplot neúměrně rostou nároky na absolutní přesnost použitých teplotních snímačů. Chyba určení rozdílů teplot je dána součtem chyb jednotlivých teploměru. [5][6]

Rozdíl teplot pod dvojnásobkem absolutní nepřesnosti jednotlivého teploměru je prakticky neurčitelný jak co do velikosti, tak co do orientace. Prakticky tedy představuje nespojitou funkci právě v **oblasti určitelnosti nulových rozdílů teplot**, k nimž rostoucí požadavky trvale směřují.

Jednou z možností jak překonat výše uvedené nedostatky standardních technických řešení monitorování termodynamických systémů pomocí soustav instalovaných snímačů teplot s převodníky se ukazuje být použití termodynamických snímačů v bilančních zapojeních. [7][8]

Ukazuje se, že skutečný stav termodynamické soustavy lze monitorovat i pomocí aktivních senzorů s teplotně závislými funkčními prvky, které ve výkonovém zpětnovazebním bilančním zapojení nemonitorují aktuální teplotu, ale aktuální vlastní výkonovou interakci s bezprostředním okolím soustavy. Jejich signál může tedy přímo (nezprostředkovaně) ukazovat na tytéž přebytky nebo nedostatky energie. Při vhodném uspořádání může tedy popisovat aktuální stav regulované soustavy mnohem věrohodněji než v případě běžně užívaných prostředků, které na tento stav usuzují pouze nepřímo prostřednictvím teplot a jejich rozdílů.

Hlavní výhodou je tedy stejná fyzikální podstata vyjadřující zjištěnou odchylku od žádaného stavu, korespondující s fyzikální podstatou nápravného opatření (regulačního zásahu). Další nezanedbatelnou výhodou může být také skutečnost, že aktivní termodynamický senzor může v krajním případě současně zastávat funkci výkonného členu, který nahrazuje aktuální (bilanční) nedostatek energie přímo svým vlastním příkonem. V případě, že akční člen a termodynamický senzor jsou představovány dvěma samostatnými funkčními prvky soustavy, platí mezi jejich aktivitami v soustavě přímá úměra.

Ve své podstatě znamená využití termodynamických senzorů v bilančních zapojeních přechod od monitorování stavu termodynamických soustav pomocí stavové veličiny, kterou je teplota, k monitorování tepelných toků, které jsou odezvou reálné události v soustavě. Takovou událostí může být například změna aktivity libovolného prvku soustavy, změna podstaty libovolného prvku soustavy, případně změna geometrického uspořádání soustavy. Přitom platí, že u správně navržených termodynamických soustav budou požadavky na monitorovaný rozsah tepelných toků v zásadě blízké jak u malých, tak u velkých (výkonných) soustav a jen málo závislé na aktuální teplotě okolí. [7][8]

Jediným východiskem, na němž mohl být praktický návrh konkrétních snímačů a zapojení založen, byla obecná teorie hraniční bilanční interakce a rovnováhy mezi dvojicí aktivních snímačů a monitorovanou soustavou. Návrh byl z počátku prováděn pouze intuitivně na základě předchozích zkušeností se souvislostmi v konkrétních řešených aplikacích, které se vždy lišily od typu monitorované události.

Do budoucna bylo ovšem nezbytné stanovit jednoznačná návrhová pravidla, která umožní kvalifikovaný návrh termodynamických snímačů v bilančních zapojeních pro další plánované aplikace.

Pro ověřování funkčnosti konstrukčního uspořádání ve stádiu návrhu potom výběr možných simulačních prostředků včetně rozšiřujících výpočtových rutin popisujících hraniční interakce na úrovni výkonových bilancí v procesu simulací.

Dá se očekávat, že praktický návrh konkrétních snímačů a zapojení bude vycházet spíše od typu monitorované události, než od aktuálních pracovních podmínek monitorované soustavy.

2 Současný stav a vymezení oblasti disertace

2.1 Monitorování termodynamických soustav

2.1.1 Monitorování pomocí soustavy teplotních snímačů.

U zavedeného způsobu termického monitorování stavu termodynamických soustav se do vybraných míst monitorované soustavy umísťuje konečný počet teploměrů s převodníky teploty na standardizovaný elektrický signál. Tyto signály se poté zaznamenávají v čase. Ze snímaných časových průběhů se usuzuje na vývoj stavu soustavy v místech instalovaných teploměrů.

Soubor teplot sejmутých ve stejném časovém okamžiku ukazuje na aktuální teplotní profil soustavy. Z aktuálních rozdílů teplot se následně na základě znalosti materiálového složení a geometrie konstrukčních prvků soustavy usuzuje na aktuální tepelné toky, tedy šíření tepla soustavou.

- 1) Každému teploměru musí být fyzicky přiřazen převodník s odpovídajícím rozsahem snímaných teplot. Ten je, mimo monitorovaných aktivit v soustavě, určen také zejména rozsahem teplot a vlastností prostředí, v němž se celá soustava může nacházet, zejména s respektem ke všem přirozeným cyklům okolního prostředí. Těmito cykly jsou myšleny zejména denní/noční rozsah teplot, letní/zimní rozsah teplot, v klimatizovaných prostorech např. rozsah regulace apod. To zvyšuje nároky na skladové zásoby náhradních dílů v sortimentu používaných teploměrů a převodníků, a snižuje citlivost instalovaného systému na minoritní události uvnitř monitorované soustavy.
- 2) Správný výběr instalovaných teploměrů a převodníků je podmíněn dobrou znalostí sledované soustavy a cyklů okolního prostředí. U složitějších soustav je nutné provádět odpovídající simulace, které umožní výběr vhodné kombinace teploměrů a převodníků. Přitom úspěšnost takovýchto simulací je mimo výpočetního výkonu hardwarových prostředků a kvality softwarového simulačního prostředí dána zejména podrobnou znalostí geometrického a materiálového uspořádání všech komponent simulované soustavy.
- 3) Předmětem simulací jsou odezvy na základní aktivity rozhodujících funkčních prvků soustavy za zpravidla mezních přípustných stavů simulované soustavy bezprostředního okolí a přechodů mezi nimi. Výsledkem je výběr míst k monitorování, určení očekávaných rozsahů teplot v nich, tedy specifikace počtu a typů teploměrů a převodníků.
- 4) Veškeré používané teploměry jsou buď zcela pasivní, nebo s definovanou malou konstantní aktivitou, pokud je její existencí funkce teploměru přímo podmíněna.

Aktivní snímače nejsou přípustné z důvodu možného ovlivnění monitorované soustavy a měronosné veličiny převodníku, což vyžaduje přísné oddělení akčních a snímacích prvků v soustavě.

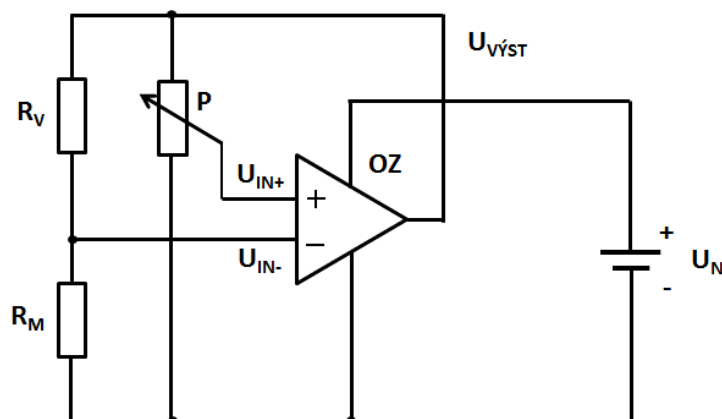
- 5) Přesnost prvků monitorovací soustavy (teploměry, převodníky) je vždy konečná. Absolutní chyba určení teploty je dána součtem nepřesností určení počátku teplotní stupnice, chybou strmosti teploměru s převodníkem a jejich dlouhodobou nestabilitou. Absolutní chyba určení rozdílů teplot je potom dána součtem absolutních chyb teploměrů a převodníků instalovaných v rozdílných místech soustavy. Z toho je zřejmé, že relativní chyba určení rozdílu teplot roste s požadavkem na snižování určovaného rozdílu teplot, až se při poklesu pod součet absolutních chyb stává rozdíl nespojitě neurčitelný jak co do velikosti tak co do orientace.

S rostoucími požadavky na zmenšující se technologická okna určujících kvalitu probíhajících technologických procesů neúměrně rostou požadavky na kvalitu použitých teploměrů a převodníků, tedy investiční náročnost pořízení a v důsledku rostoucí potřeby pravidelného metrologického navazování také provozní náklady na monitorování teplotních projevů daných procesu jako takové. Informace využitě v této kapitole jsem čerpal z následující literatury. [1][2][3][4][5][6]

2.1.2 Monitorování pomocí termodynamických snímačů.

V poslední době byl popsán způsob monitorování v termodynamických soustavách pomocí termodynamických snímačů v prostých zpětnovazebních zapojeních. Ty vždy korespondovaly s potřebou popisované aplikace, přičemž soubor popsanych aplikací je již značně rozsáhlý. Všechny však mají jedno společné jádro, spočívající v asymetrickém zapojení dvojice aktivních senzorů snímače ve zpětnovazebním bilančním zapojení.

Výchozím společným představitelem všech je uspořádání a zapojení uvedené na Obr.1.



Obr. 1 Výchozí bilanční zapojení

Dvojice teplotních odporových senzorů R_V a R_M je instalována společně ve vybraném místě soustavy v blízkém okolí prvku soustavy (sledovaných změn), jehož změny aktivity se mají citlivě monitorovat. V literatuře je princip funkce vysvětlován na základě “zdánlivého” rozdílu teplot, odvozeného ze stále podmínky stability ideálního operačního zesilovače OZ vycházející z rovnosti jeho vstupních napětí U_{IN-} a U_{IN+} :

$$\begin{aligned}
U_{IN-} &= U_{IN+} \\
U_{VÝST} \frac{R_M}{R_M + R_V} &= U_{VÝST} \frac{\alpha \cdot P}{P} \\
\frac{R_M}{R_M + R_V} &= \alpha \\
\frac{R_{M0}(1 + TCR \cdot T_M)}{R_{M0}(1 + TCR \cdot T_M) + R_{V0}(1 + TCR \cdot T_V)} &= \alpha \\
\frac{1}{1 + k \left(1 + \frac{TCR \cdot (T_V - T_M)}{1 + TCR \cdot T_M} \right)} &= \alpha \\
1 &= \alpha + \alpha k \left(1 + \frac{TCR \cdot (T_V - T_M)}{1 + TCR \cdot T_M} \right) \\
\frac{1 - \alpha - \alpha k}{\alpha k \cdot TCR} &= \frac{T_V - T_M}{1 + TCR \cdot T_M} \quad (1)
\end{aligned}$$

kde T_V a T_M jsou okamžité aktuální teploty funkčních vrstev teplotních senzorů, TCR je společný teplotní koeficient odporu, α je úhel natočení nastavovacího potenciometru P , k je koeficient asymetrie zapojení definovaný stálým poměrem odporů teplotních senzorů vztažený na počátek teplotní stupnice.

Pravá strana rovnice představuje tzv. *zdánlivý rozdíl teplot*. Ten bude zapojení udržovat na stále "konstantní" úrovni, neboť levá strana rovnice představuje konstantu.

Skutečný rozdíl teplot má dvě složky, statickou (konstantní) a dynamickou (proměnnou v závislosti na změně teploty v místě hodnotou menšího ze senzorů).

$$T_V - T_M = \frac{1 - \alpha - \alpha k}{\alpha k \cdot TCR} + \frac{1 - \alpha - \alpha k}{\alpha k \cdot TCR} \cdot TCR \cdot T_M \quad (2)$$

statická složka dynamická složka

Tento skutečný rozdíl teplot představuje v soustavě stavovou veličinu, která ukazuje přednostně na změny stavu soustavy, které mají charakter tepelných toků. Přitom statická složka ukazuje na celkové ustálené pozadí, zatímco dynamická složka ukazuje na aktuálně probíhající změnu tj. přechodový děj soustavy.

Stav každého jednotlivého teplotního senzoru snímače je dán jeho vlastní výkonovou aktivitou v přímé interakci s jeho bezprostředním okolím v soustavě. Celková aktuální výkonová aktivita snímače P je dána součtem výkonových aktivit obou senzorů P_M a P_V :

$$\begin{aligned}
P &= P_M + P_V = U_{VÝST} \frac{U_{VÝST}}{R_M + R_V} \\
P &= P_M + P_V = U_{VÝST} \frac{U_{VÝST}}{R_{M0}(1 + TCR \cdot T_M) + R_{V0}(1 + TCR \cdot T_V)}
\end{aligned}$$

$$P = P_M + P_V = \frac{U_{VYST}}{R_{M0}(1 + TCR \cdot T_M)} \cdot \frac{U_{VYST}}{1 + k + k \cdot TCR \frac{T_V - T_M}{1 + TCR \cdot T_M}}$$

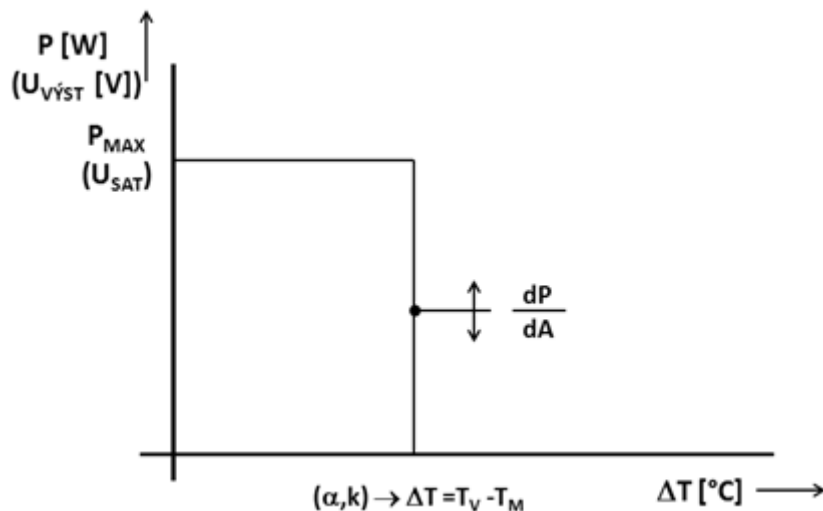
Na základě těchto skutečností můžeme tvrdit, že ustálená hodnota odezvy zapojení (výstupního signálu U_{VYST}) charakterizuje ustálený stav soustavy, zatímco jeho průběh, mění se v čase, charakterizuje přechodový děj soustavy.

Přitom celkový zpětnovazební příkon snímače udržuje “funkční vrstvy senzorů snímače” ve stavu odpovídajícím přednastavené úrovni, tj. ve výchozím (nastaveném) ustáleném stavu. Tím bilančně místně kompenzuje změny stavu soustavy.

Průběh výstupního signálu (U_{VYST}) v čase přímo charakterizuje přechodové děje a změny stavu soustavy (oproti původní zvolené “přednastavené” ustálené úrovni) a to s vysokou dynamickou citlivostí. Bude-li zvolená ustálená úroveň soustavy odpovídat jejímu normálnímu pracovnímu zatížení, projeví se v časové odezvě výstupního signálu veškeré odchylky od žádaného stavu. Přednostně pak jejich projevů v místech instalace senzorů snímače.

Umístíme-li jeden ze senzorů snímače v blízkosti “minoritní” aktivity, zatímco druhý do hmotného pasivního těla dané soustavy vzdáleně od zdrojů aktivit “majoritních”, monitorujeme přednostně “minoritní” událost, která je s vysokou citlivostí odlišitelná od jinak “majoritních” aktivit souvisejících s normálním zatížením soustavy a změn okolního prostředí v širokém přípustném pracovním rozsahu.

Názorně je to patrné z teoretické výkonové charakteristiky bilančního zapojení uvedeného na Obr. 2. Změnou postavení jezdce potenciometru (α) bilančně přizpůsobíme termodynamický snímač normálnímu pracovnímu zatížení soustavy. Na teoretické výkonové charakteristice to znamená posun svislé části charakteristiky podél vodorovné osy (ΔT) tak, aby reálná úroveň signálu odezvy (P , U_{VYST}) odpovídala zhruba polovině disponibilního příkonu snímače. Důvodem je zajištění dostatečného dynamického rozsahu odezvy na probíhající děje.



Obr. 2 Teoretická výkonová charakteristika

Každá dynamická změna aktivity (A) nebo stavu soustavy v blízkém okolí senzoru snímače je nadále přímo kompenzována změnou zpětnovazebního příkonu (P) a v odezvě se projeví jako časová událost, která tuto změnu charakterizuje. Přitom typická odezva na

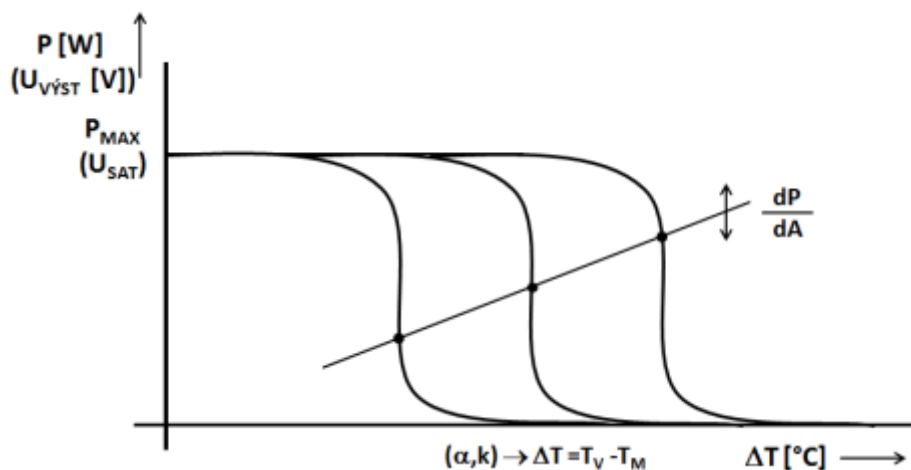
skokovou událost má charakter exponenciálního přechodu z výchozího k následujícímu ustálenému stavu.

Tato metoda nově připouští nekonstantní aktivitu senzorů snímače s tím, že vlastní proměnnou aktivitou kompenzuje interakci na vlastních hranicích se soustavou a tak sám sebe udržuje na konstantní teplotě, tedy v trvale ustáleném stavu. Tím se stává výjimečným vlastním aktivním prvkem soustavy, což mu jako snímacímu prvku propůjčuje zajímavé a dříve nepopsané vlastnosti, zejména:

- a) vysokou dynamickou citlivost na změny stavu soustavy v jeho bezprostředním okolí
- b) změny výstupního signálu přímo korespondují se změnami vzájemného tepelného toku soustavou mezi vlastními teplotními senzory snímače

Jejich praktické uplatnění vyžaduje odlišný přístup chápání událostí probíhajících v termodynamické soustavě s tím, že za ustálený stav lze považovat situaci, kdy jsou ustálené tepelné toky soustavou. Za přechodný děj potom přechod mezi dvěma ustálenými stavy, tedy událost projevující se typickým průběhem změn výstupního signálu charakterizujícího průběh změn tepelného toku.

U prakticky realizovaných aplikací se odlišnost reálného chování operačního zesilovače projeví ve výkonové charakteristice bilančního zapojení, jak je patrné z Obr. 3, z něhož se dá odvodit chování termodynamických senzorů v reálných bilančních zapojeních. Při určitém nastavení úhlu nastavení (α) potenciometru (P) bude bezprostředně po připojení napájecího napětí senzorům snímače dodáván prakticky plný disponibilní výkon zapojení, který přehřívá jejich funkční vrstvy. V souvislosti s tím, že aktuální hodnoty odporů velkého a malého senzoru nejsou vhodné, rostou nejen jejich vlastní teploty, ale také jejich vzájemný teplotní rozdíl $\Delta T = T_V - T_M$. S tím, jak se postupně blíží k přednastavené hodnotě definované parametry k a α , klesá senzorům dodávaný příkon a také úroveň výstupního signálu. Tak se ustálí výchozí přednastavená bilanční rovnováha.



Obr. 3 Reálná výkonová charakteristika

Dosažení výchozího ustáleného stavu je přirozeně možné jen tehdy, je-li monitorovaná soustava také v ustáleném stavu. Veškerý příkon každého ze senzorů snímače se v takovém ustáleném stavu přes hranice senzorů vysdílí s bezprostředním okolím soustavy v místě instalace, čímž se zde ustaví výchozí bilanční rovnováha. Ta se bude nadále udržovat v souladu s podmínkou stability bilančního zapojení, tj. bude se udržovat konstantní „zdánlivý“ rozdíl teplot funkčních vrstev obou senzorů snímače.

U soustavy v ustáleném stavu lze pro takovou rovnováhu psát bilanční podmínku (2) v příspěvkovém tvaru:

$$\Delta T_V + T_{SV} - \Delta T_M - T_{SM} = T_V - T_M = k + k \cdot TCR \cdot (\Delta T_M - T_{SM})$$

U zcela pasivní soustavy, kde místní teploty v soustavě $T_{SV}=T_{SM}=T_S=T_{OK}$ jsou ve všech místech soustavy shodné a rovné teplotě okolí, v němž se soustava v ustáleném stavu nachází. Odtud můžeme pro rozdíl příspěvků teplot funkčních vrstev senzorů v důsledku vlastní aktivity snímače psát:

$$\Delta T_{Vp} - \Delta T_{Mp} = k + k \cdot TCR \cdot (\Delta T_{Mp} - T_{Sp})$$

Tu lze od předchozí odečíst:

$$\Delta T_V - \Delta T_{Vp} + T_{SV} - \Delta T_M + \Delta T_{Mp} - T_{SM} = kTCR \cdot (\Delta T_M - \Delta T_{Mp} - T_{SM} - T_{Sp})$$

Po úpravě:

$$\begin{aligned} &(\Delta T_V - \Delta T_M) + (T_{SV} - T_{SM}) + kTCR(T_{SM} - \Delta T_M) = \\ &(\Delta T_{Vp} - \Delta T_{Mp}) + kTCR(T_{Sp} - \Delta T_{Mp}) \end{aligned}$$

Je zřejmé, že následná změna stavu monitorované soustavy je nadále v místech instalace senzorů snímače přímo kompenzována řízenou změnou příkonu snímače tak, že vznikající místní rozdíl teplot soustavy v průběhu přechodového děje od pasivního k aktivnímu stavu soustavy je přímo nahrazen rozdílem nestejných přírůstků teplot aktivních vrstev senzorů snímače.

Místní rozdíl teplot v aktivních monitorovaných soustavách je přímým ukazatelem tepelného toku, tj. energie okamžitě distribuované soustavou od „teplejšího ke chladnějšímu“ místu soustavy, okamžitý příkon snímače bude tedy také jeho ukazatelem. Přitom je zřejmé, že jde o kompenzaci dynamickou a negativní. To znamená, že nárůst tepelného toku mezi místy instalace senzorů snímače v důsledku aktivity jejího libovolného prvku je kompenzován poklesem jeho vlastní aktivity a naopak. Obdobně se zřejmě s opačným znaménkem projeví změny aktivity v soustavě okolního prostředí.

S uvážením reálného tvaru převodní charakteristiky se dá usoudit, že citlivost bilančního zapojení na probíhající místní změny stavu monitorované soustavy bude nejvyšší v okolí jejího inflexního bodu a bude klesat s odchylkou užitečného signálu od něj. Tato „nevýhoda“ zapojení je však zřejmě kompenzována faktem, že funkce zapojení není ohraničena žádným omezením co do rozsahu sledovatelných stavů soustavy.

Pro změnu stavu soustavy vyvolanou změnou aktivity libovolného jí vlastního prvku, lze obdobně odvodit vztah (3) z podmínky stability bilančního zapojení, které si pro tento účel upravím následujícím způsobem:

$$k = \frac{1 - \alpha - \alpha k}{\alpha k \cdot TCR} = \frac{T_V - T_M}{1 + TCR \cdot T_M}$$

$$1 = \frac{T_V - T_M}{k} - TCR \cdot T_M \quad (3)$$

Ten musí platit pro každý z po sobě následujících ustálených stavů, po úpravě tedy:

$$0 = \frac{T_{V_{k+1}} - T_{M_{k+1}}}{k} - \frac{T_{V_k} - T_{M_k}}{k} - TCR \cdot (T_{M_{k+1}} + T_{M_k})$$

V přírůstkovém tvaru potom:

$$0 = \frac{\Delta T_{V_{k+1}} - \Delta T_{M_{k+1}}}{k} - \frac{\Delta T_{V_k} - \Delta T_{M_k}}{k} + \frac{T_{V_{Sk+1}} - T_{M_{Sk+1}}}{k} - \frac{T_{V_{Sk}} - T_{M_{Sk}}}{k} - TCR \cdot (\Delta T_{M_{k+1}} + \Delta T_{M_k} + T_{M_{Sk+1}} + T_{M_{Sk}})$$

Stálá podmínka stability senzorů termodynamického snímače v bilančním zapojení v původní interpretaci, tj. jako řízenou aktivitou udržovaný konstantní, tj. stálý „zdánlivý“ rozdíl teplot mezi instalací senzoru definovanými místy soustavy se tedy dá nově interpretovat jako: Řízenou aktivitou snímače přímo místně kompenzovaný vliv změn stavu monitorované soustavy. Tak ji lze chápat za nově definovanou funkci jednoznačně popisující „dynamiku změn stavu“ libovolné tedy obecné termodynamické soustavy. Informace využití v této kapitole jsem čerpal z následující literatury. [7][8][9][10]

2.1.3 Srovnání způsobů monitorování, aplikační omezení

Souhrn poznatků předchozích kapitol poukazuje na problematické využití klasického způsobu monitorování pomocí soustavy teplotních snímačů pro záznam minoritních událostí v termodynamických soustavách, protože:

S klesající velikostí sledované aktivity klesá také jí vyvolaný místní přírůstek teploty, který je potřeba odlišit od teploty zbytku pasivní části soustavy. U klasických metod vede k měření malých rozdílů teplot. [11][12] S klesajícím rozdílem teplot však roste chyba metody a tak se malé rozdíly teplot stávají prakticky neodlišitelnými v důsledku konečné absolutní přesnosti určení jednotlivé teploty.

Naroste-li požadavek na určování rozdílů teplot srovnatelných s nepřesností metody určování jednotlivé teploty, stane se neurčitelným z pohledu spolehlivého odlišení teplejšího a chladnějšího místa soustavy a relativní chyba určení sledovaného rozdílu teplot může růst nade všechny meze.

Způsob monitorování pomocí termodynamických snímačů ve zpětnovazebních výkonových zapojeních vykazuje spojitou a dostatečně citlivou odezvu na projevy monitorované minoritní události v blízkém okolí přednastavené rovnováhy. Ta je ale stále závislá na celkovém stavu soustavy a je třeba ji bezprostředně před zahájením monitorování

vždy korigovat. Z toho vyplývá, že jsme schopni monitorovat pouze očekávané minoritní události, pro které jsme schopni předem korigovat nastavení ustálené hodnoty výstupního signálu do sledovatelné oblasti. Každá významná majoritní změna stavu soustavy tedy přivede systém monitorování minoritní události mimo sledovatelný rozsah, její opakovaný záznam je možný jen po předchozí korekci výchozí bilance.

2.2 Specifikace cílů disertační práce

Hlavním cílem této práce je výzkum a vývoj metody pro odlišení nepatrných teplotních jevů (minoritních událostí) v obecných termodynamických soustavách na velmi výrazném pozadí (majoritních změn) stavu soustavy jako celku. Základním problémem při monitorování takových minoritních událostí v reálných termodynamických soustavách je protichůdnost požadavků na vysokou citlivost, ale přitom také na stabilitu, v širokém rozsahu přípustných stavů soustavy.

Citlivost zavedených způsobů teplotního monitorování vždy klesá s rostoucím požadavkem na rozsah přípustných teplot v místě instalace teplotního snímače. Naopak vysoce citlivá (např. můstková zapojení) mohou být použita jen v úzkém rozsahu teplot. To je předurčuje k monitorování událostí typu odchylky od žádaného stavu v místech soustavy, které jsou stabilizovány jiným nezávislým regulátorem. Další možností pak může být monitorování autonomních událostí v místech soustavy izolovaných od ostatního okolí.

Je tedy zřejmé, že pomocí standartního teplotního mapování soustavy není možné na výrazném teplotním pozadí charakterizujícím stav sledované soustavy spolehlivě odlišit minoritní události, které však mohou mít až fatální vliv na její funkčnost.

V současné době známé vlastnosti termodynamických snímačů v bilančních zapojeních ale dávají dobrý předpoklad k nalezení řešení, které eliminuje protichůdnost požadavku na vysokou citlivost a stabilitu v širokém rozsahu přípustných stavů soustavy, charakterizovaných například její průměrnou stavovou teplotou. Jeho odezva je z principu funkce závislá na rozdílu teplot (tepelném toku) mezi dvěma místy soustavy, to je na okamžitým rozdílu teplot, nikoliv na jejich průměrné hodnotě.

Dosažení hlavního cíle je realizováno výzkumem a optimalizací následujících dílčích kroků a je podmíněno dosažením následujících dílčích cílů:

- 1) Nalezení nového uspořádání termodynamického snímače v monitorované soustavě umožňující práci v širším rozsahu pracovních zatížení soustavy při zachování dostatečné citlivosti.
- 2) Návrh a optimalizace bilančního zapojení za účelem přizpůsobení hraniční bilanční rovnováhy aktuálnímu ze širokého spektra možných pracovních zatížení soustavy.
- 3) Zdokonalení bilančního zapojení rozšířením o řídicí jednotku, umožňující automatické přizpůsobení projevu aktuálního zatížení na stav soustavy.
/adaptibilní TDS/

V závěrečné etapě po ověření funkčnosti bude třeba originální způsob monitorování minoritních událostí v obecných termodynamických soustavách jednoznačně popsat včetně postupů praktického uplatnění v technologických procesech a mikroelektronických aplikacích.

3 Výsledky disertace

Jednoduché výchozí bilanční zapojení (Obr.1) a vztah pro výchozí bilanční rovnováhu (1) ukazuje na schopnost spojitého monitorování změn malých rozdílů teplot (tepelných toků) na pozadí majoritního stavu soustavy. Přitom ukazuje také na možnost nastavení pracovního bodu korespondujícího s libovolným výchozím majoritním stavem soustavy a to vhodnou volbou teplotních senzorů snímače (TCR, k) a přednastavením výchozí bilance nastavovacím prvkem (α). Významná změna majoritního pozadí stavu soustavy (průměrná teplota) však vyžaduje znovu dostavení výchozí bilance korespondující s novým majoritním stavem soustavy. Nevykazuje tedy schopnost automatického dostavení.

Toho lze zřejmě dosáhnout změnou uspořádání, případně počtem aktivních senzorů, optimalizací bilančního zapojení, nebo jeho rozšířením o další řídicí jednotku.

Po dokončení optimalizačního procesu bude možné usilovat o ověření funkčnosti nových uspořádání na laboratorních vzorcích a následně v praktických aplikacích.

3.1 Nové uspořádání termodynamických snímačů

Východiskem pro návrh změn uspořádání aktivních senzorů termodynamického snímače podmiňujících jeho uplatnění pro odlišení minoritních událostí na pozadí majoritních změn stavu soustavy je analýza nedostatků stávajícího známého řešení pro předpokládanou aplikaci. Na základě odhalených příčinných souvislostí lze definovat soubor možných nápravných opatření, teoretickým rozбором určit jejich hypotetickou účinnost a prokázat dodržení podmínek stability, modelováním a simulacemi, případně experimentem funkční způsobilost a realizací vybrané průmyslové aplikace také praktickou využitelnost a provozní spolehlivost.

Analýzou známých řešení [7][8] prezentovaných v kapitole 2.1.2 Způsob termodynamického monitorování, jsem identifikoval jejich společnou podstatu spočívající v platnosti obecné podmínky jejich stability odvoditelné ze základní vlastnosti zpětnovazebního bilančního zapojení:

$$(T_2 - T_1)' = \frac{(T_2 - T_1)}{(1 + TCR \cdot T_1)} = \frac{\alpha \cdot (k + 1) - 1}{TCR \cdot (1 - \alpha)} = konst.$$

Rozbor této společné podmínky stability ukazuje na následující nedostatky bránící uplatnění v předpokládané aplikaci.

- a) Teplotní závislost citlivosti zapojení na průměrnou teplotu soustavy ovlivňovanou majoritními aktivitami v soustavě a okolí.
- b) Nelinearita závislosti nastavení výchozího pracovního bodu, tj. výchozí bilanční rovnováhy na postavení jezdece nastavovacího trimru.

Odstranění těchto dvou hlavních problémů stávajících uspořádání povede k:

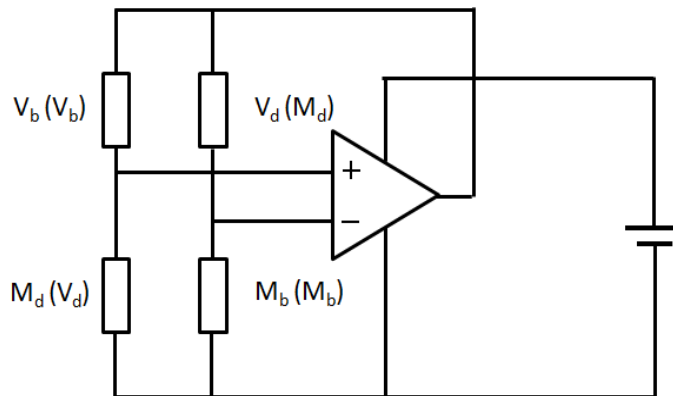
- ad a) Významnému zvýšení odlišitelnosti minoritních událostí v monitorované soustavě a dalšímu významnému potlačení citlivosti na majoritní události v soustavě

související s jejím normálním pracovním zatížením. To znamená citlivost na běžných provozních změnách stavu soustavy.

- ad b) Významnému zvýšení adaptibility snímače a zapojení v širokém pracovním rozsahu monitorované soustavy, stejně jako k rozšíření sortimentu možných praktických aplikací.

3.1.1 Zapojení a podmínky stability

Jako základní opatření k nápravě jsem navrhnul rozšíření počtu aktivních senzorů snímače ze dvou na čtyři (viz Obr.4), přičemž z požadavku na zachování základních funkcí použitého principu snímání vyplývá potřeba zachování asymetrie zapojení.



Obr. 4 Upravené bilanční zapojení (čtyř-senzorové zapojení)

Z výše uvedeného vyplývá, že senzory snímače budou v soustavě umístěovány (po odporem neshodných dvojicích) ve směru od zdroje minoritní události do vztažného, tepelnou kapacitou majoritního (nejlépe pasivního), těla soustavy, v níž chceme minoritní událost monitorovat.

K tomuto uspořádání lze obdobně jako u výchozího společného představitele (viz. kapitola 2.1.2) odvodit podmínku stability:

$$\frac{(T_{Vd} + T_{Md}) - (T_{Vb} + T_{Mb})}{(T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md})} = TCR \quad (4)$$

Odvození podmínky stability pro nově navržené uspořádání je uvedeno v samostatné příloze viz. kapitola 5.1

Celkový ustálený výkon snímače, tj. všech senzorů je dán součtem výkonů v jednotlivých větvích zapojení, tj.

$$P = (P_{Md} + P_{Vb}) + (P_{Mb} + P_{Vd})$$

$$P_+ = \frac{U_{out}^2}{R_{Md} + R_{Vb}} \quad P_- = \frac{U_{out}^2}{R_{Mb} + R_{Vd}}$$

$$P = U_{out}^2 \left(\frac{1}{R_{Md} + R_{Vb}} + \frac{1}{R_{Mb} + R_{Vd}} \right) = P_+ + P_- = P_d + P_b$$

Ustálené výkonové poměry na jednotlivých senzorech snímače opět přímo souvisí se stavem monitorované soustavy v místech instalace, neboť výkon senzorů snímače se hraniční interakcí sdílí se soustavou podle následujících vztahů:

$$P_{Vb} = \frac{S_{Svb}(T_{Vb} - T_b)}{R_{TSS}} \quad P_{Mb} = \frac{S_{SMb}(T_{Mb} - T_b)}{R_{TSS}}$$

$$P_{Vd} = \frac{S_{Sdb}(T_{Vd} - T_d)}{R_{TSS}} \quad P_{Md} = \frac{S_{SMd}(T_{Md} - T_d)}{R_{TSS}}$$

Senzory snímače v příslušném místě instalace (b nebo d) lze libovolně přibližovat až po fyzický kontakt. V takovém případě se potom skrze jejich společný povrch (S_{Sb} nebo S_{Sd}) sdílí součet jejich výkonů podle vztahů:

$$P_b = P_{Vb} + P_{Mb} = \frac{S_{Sb}}{R_{TSS}} ((T_{Vb} - T_b) + (T_{Mb} - T_b))$$

$$P_d = P_{Vd} + P_{Md} = \frac{S_{Sd}}{R_{TSS}} ((T_{Vd} - T_d) + (T_{Md} - T_d))$$

a při shodném fyzickém provedení obou částí (B a D) snímače pak v součtu bude:

$$P = P_{Vb} + P_{Mb} + P_{Vd} + P_{Md} = \frac{S_{Sb}}{R_{TSS}} (T_{Vb} + T_{Vd} + T_{Mb} + T_{Md} - 2(T_b + T_d)) \quad (5)$$

ale také:

$$\frac{R_{TSS}}{S_{Sb}} (P_b - P_d) = (T_{Vb} + T_{Mb}) - (T_{Vd} + T_{Md}) + 2(T_d - T_b) \quad (6)$$

Lze tedy tvrdit, že okamžitý ustálený příkon termodynamického snímače nastavuje místní přírůstky teplot jednotlivých senzorů snímače (5) oproti jejich bezprostřednímu okolí v soustavě. Současně ale také nastavuje rozdíl součtů teplot dvojic místně příslušných senzorů (6) závisle na rozdílu místně příslušných teplot soustavy v jejich bezprostředních okolích.

Přímým porovnáním (6) a (4) lze snadno dospět k závěru, že změny rozdílů místně příslušných teplot soustavy jsou porušením podmínky stability (statická část), které vyvolá dynamickou odezvu bilančního zapojení, které změnou dodávky příkonu přispěje k ustavení nové bilanční rovnováhy.

To znamená, že změny poměrů v soustavě charakterizované např. změnou hraniční interakce s jednou místně příslušnou dvojicí senzorů snímače jsou kompenzovány změnami souhrnné aktivity, tedy výkonu dodávaného snímači. Přitom však dochází současně k jeho přerozdělení mezi jednotlivé senzory tak, aby podmínka stability (4) zůstala zachována. Prakticky to znamená, že vyvolá-li místně příslušná změna poměrů v soustavě pokles celkového příkonu snímače. Tento příkon se současně přerozdělí ve prospěch místně nepřislušného páru senzorů snímače a naopak (odtud vysoká citlivost na minoritní místně příslušné události v blízkosti některého z párů snímače).

Uvážíme-li, že pro teplota libovolného snímače je dána součtem teploty místa instalace a příspěvku vyvolaného jeho vlastní aktivitou (příkonem), lze pro každý z nich psát:

$$T_{Vb} = \Delta T_{Vb} + T_b$$

Podrobnějším rozbohem lze ukázat, že v libovolném ustáleném stavu pro konstrukčně shodné senzory a způsob zástavby platí:

$$P = \frac{S_S}{R_{TSS}} (\Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb} + \Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md}) = 2 \left(\frac{S_S}{R_{TSS}} (\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md}) + \frac{S_S R_{Tbd}}{S_{bas} R_{TSS}} \frac{T_d - T_b}{R_{Tbd}} \right)$$

a také:

$$P = \frac{S_S}{R_{TSS}} (\Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb} + \Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md}) = 2 \left(\frac{S_S}{R_{TSS}} (\Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb}) + \frac{S_S R_{Tbd}}{S_{bas} R_{TSS}} \frac{T_b - T_d}{R_{Tbd}} \right)$$

vztahy (7)

Odtud je zřejmé, že snímač monitoruje prostřednictvím užitečného signálu aktuální tepelné toky vyvolané původními soustavě vlastními aktivitami. Přitom jsou z pohledu primární funkce obě místa instalace zcela rovnocenné a lze ukázat, že rychlost reakce snímače na místní změny poměrů může být značně vyšší než dynamika změn samotných. Tato vlastnost umožňuje citlivé „objektivní“ monitorování místních změn poměrů v soustavě i v průběhu přechodných dějů.

Z výchozí podmínky stability (4)

$$(T_{Vd} + T_{Md}) - (T_{Vb} + T_{Mb}) = TCR(T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md})$$

lze určit součet teplot všech aktivních senzorů snímače

$$(T_{Vd} + T_{Md}) + (T_{Vb} + T_{Mb}) = 2(T_{Vb} + T_{Mb}) + TCR(T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md})$$

v příspěvkové reprezentaci

$$\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md} + \Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb} + 2(T_d + T_b) = 2(T_{Vb} + T_{Mb}) + TCR(T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md})$$

a v součtu teplot aktivních vrstev senzorů pak

$$2(\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md} + \Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb}) + 4(T_d + T_b) = 2(T_{Vb} + T_{Mb} + T_{Vd} + T_{Md})$$

$$\frac{\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md} + \Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb}}{4} = \frac{T_{Vb} + T_{Mb} + T_{Vd} + T_{Md}}{4} - \frac{T_d + T_b}{2} \quad (8)$$

Tato rovnice vyjadřuje skutečnost, že průměrné navýšení teploty senzorů v důsledku aktivity snímače v bilančním zapojení je rovno rozdílu jejich průměrné teploty a střední teploty jejich bezprostředního okolí v soustavě.

Ze stejné výchozí podmínky stability (4)

$$(T_{Vd} + T_{Md}) - (T_{Vb} + T_{Mb}) = TCR(T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md})$$

lze opět v příspěvkové reprezentaci psát

$$(\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md} + 2T_d) - (\Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb} + 2T_b) = TCR(T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md})$$

a z obou lze pro **rozdíl součtů teplot** aktivních vrstev senzorů, stejně jako rozdíl součtů jejich přírůstků odvodit:

$$(T_{Vd} + T_{Md}) - (T_{Vb} + T_{Mb}) = (\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md}) - (\Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb})$$

a odtud

$$(T_{Vd} + T_{Md}) - (\Delta T_{Vd} + \Delta T_{Md}) = (T_{Vb} + T_{Mb}) - (\Delta T_{Vb} + \Delta T_{Mb})$$

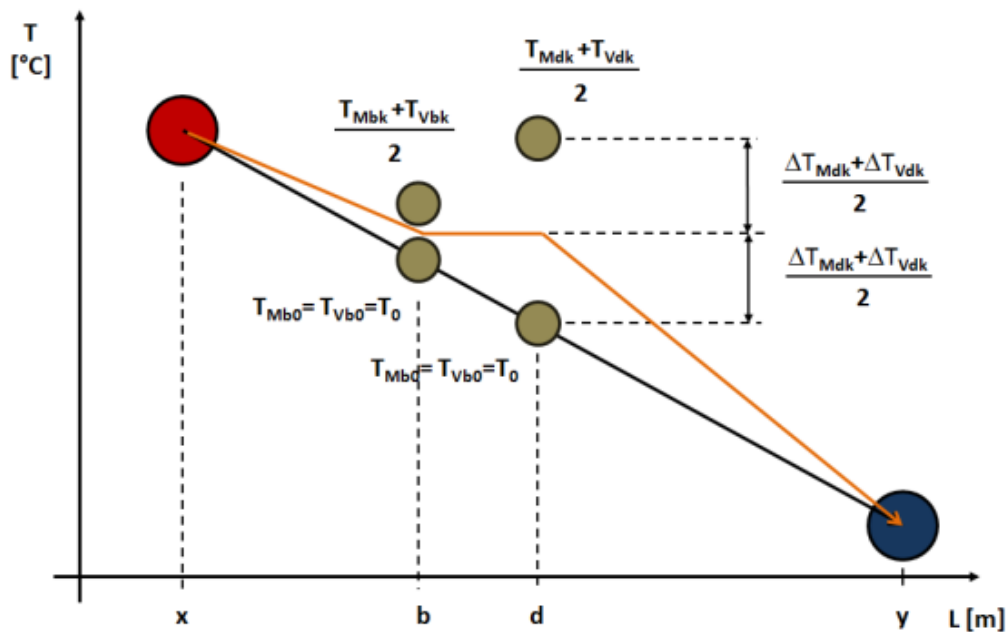
tedy

$$T_{Vd} - \Delta T_{Vd} + T_{Md} - \Delta T_{Md} = T_{Vb} - \Delta T_{Vb} + T_{Mb} - \Delta T_{Mb}$$

$$T_d = T_b \quad (9)$$

Termodynamický snímač v bilančním zapojení se stálou podmínkou stability rozdílným příkonem vlastních senzorů udržuje shodu teplot v místech instalace dvojic neshodných senzorů.

Uvážíme-li podmínku současné platnosti obou výše odvozených vztahů (8) a (9), můžeme nadále předpokládat následující chování snímače v bilančním zapojení.



Obr. 5 Interpretace chování snímače v bilančním zapojení

Celkový příkon snímače se spotřebuje k souhrnnému navýšení teplot aktivních vrstev všech senzorů tak, že jeho nerovnoměrným rozložením mezi *místně příslušné dvojice* senzorů kompenzuje původní rozdíl stavu (teplot) soustavy v jejich bezprostředním okolí. V libovolném ustáleném stavu pak ustaví místní bilanční rovnováhu, pro niž je charakteristická shoda teplot bezprostředního okolí dvojic senzorů snímače podle vztahu (9). Tato situace je graficky znázorněna na Obr. 5. Prakticky tak tedy jejich rozdílnou aktivitou kompenzuje původní tepelný tok soustavou mezi místy jejich instalace. Výkon dodávaný do snímače bilančním zapojením tedy představuje souhrnnou potřebu tepla k zajištění tohoto stavu a je přímým ukazatelem původního, snímačem aktuálně kompenzovaného tepelného toku.

3.1.2 Přínosy řešení dílčího cíle 1

Rozšíření počtu teplotních senzorů termodynamického snímače z původních dvou na čtyři představuje změnu bilančního zapojení, pro které platí nová podmínka dosažení a udržování bilanční rovnováhy. Prosté porovnání bilančních podmínek původního (1) a nového (4) uspořádání ukazuje, že:

- Na rozdíl od výchozího uspořádání (Obr.1), kde úroveň udržované hraniční rovnováhy je závislá na volbě konstrukčních parametrů jak snímače tak zapojení (parametry α , k , TCR), u nového z nich (viz Obr.4) již jen na volbě senzorů snímače (jen parametr TCR).
- Přímá závislost žádané odezvy původního snímače $T_V - T_M$ také na absolutním majoritním pozadí (člen $1 + TCR \cdot T_M$) je redukována na závislost na ukazateli relativního majoritního pozadí (člen $T_{Vb} \cdot T_{Mb} - T_{Vd} \cdot T_{Md}$). Přechod od absolutního vlivu pozadí, který se vůči žádané dynamické odezvě projevuje v plné míře k jeho relativnímu uplatnění, sice zcela neřeší konečný cíl práce, představuje však významnou redukci vlivu potlačovaných majoritních událostí, která v dalším umožní zvyšování vlastní dynamické citlivosti na monitorované minoritní události (člen $(T_{Vb} + T_{Mb}) - (T_{Vd} + T_{Md})$).

To představuje splnění dílčího cíle práce naplněním očekávaných přínosů změnou uspořádání snímače v termodynamické soustavě, jak vyplývá z Obr.4. Jeho praktické využití je stejně jako u výchozího řešení podmíněno určením podmínek stanovení hraničních výkonových interakcí.

3.2 Rozšíření bilančního zapojení

Podrobným rozbořením bilančního zapojení na Obr. 4 a podmínky stability (4) pro případ pasivní symetrické termodynamické soustavy se středově symetrickým rozmístěním dvojic senzorů snímače lze ukázat, že podmínka stability (4) bude splněna pro libovolné výstupní napětí U_{VYST} . To znamená, že v takovém výjimečném případě může být soustava s instalovaným snímačem termodynamicky nestabilní. Nestabilita bude potom přirozeně klesat s odchylkou reálného stavu soustavy od tohoto výjimečného stavu (geometrického uspořádání).

Míra asymetrie geometrického uspořádání vyvolá odpovídající odlišnost místních interakcí v bezprostředních okolích uspořádaných dvojic senzorů snímače. Ta bude úměrná takové asymetrii a odezva v podobě výstupního napětí již bude definovatelná, čímž bude danému zapojení růst stabilita.

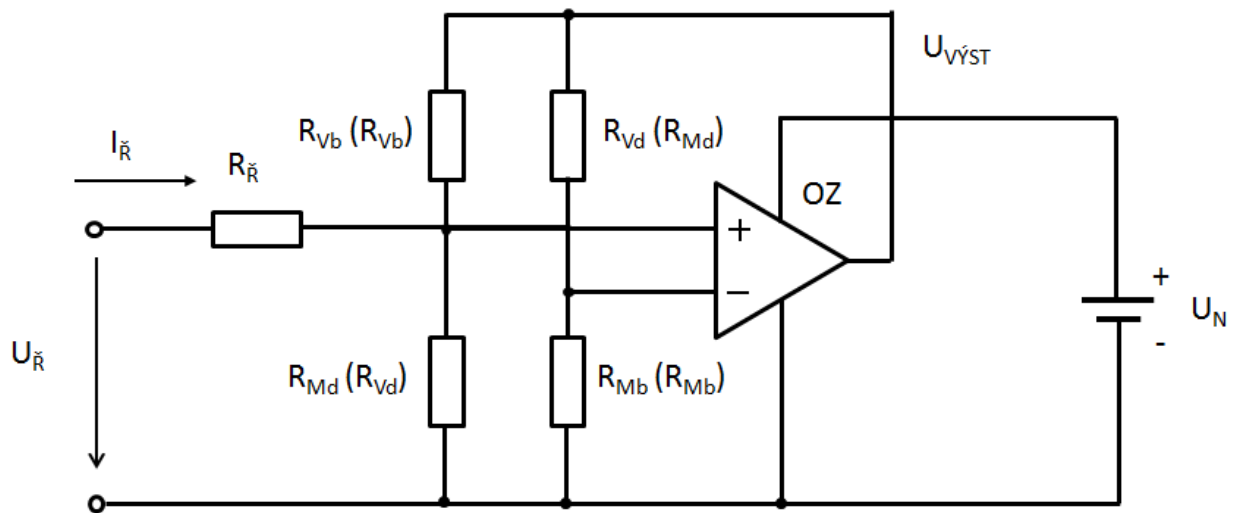
U soustavy s vysokým pracovním zatížením se dá očekávat významný „normální“ rozdíl místních teplot v bezprostředním okolí umístěných dvojic senzorů snímače, na jehož pozadí se teprve budeme snažit identifikovat minoritní události s významně nižším teplotním ovlivněním této události blízké dvojice senzorů snímače.

Proto je třeba najít způsob přednastavení výchozí bilanční úrovně (výstupního signálu) korespondující s normálním pracovním zatížením soustavy před zahájením monitorování výskytu minoritní události. Zapojení je třeba rozšířit o způsob nastavení stabilní výchozí rovnováhy ve velmi širokém pracovním rozsahu soustavy při zachování vysoké citlivosti na minoritní změny v bezprostředním okolí vybrané dvojice senzorů snímače, což je druhým dílčím cílem práce (viz kapitola 2.2.).

3.2.1 Aktivní nastavení výchozí bilanční rovnováhy

Výchozímu bilančnímu zapojení podle Obr. 4 lze „vnutit“ termodynamickou stabilitu v širokém rozsahu místních interaktivit pomocí řídicího napětí v rozšířeném zapojení podle Obr. 6.

U ideálního operačního zesilovače zajistí přivedení řídicího napětí U_R na svorku IN+ přes oddělovací odpor R_R i v případě výše popsaného výjimečného stavu soustavy termodynamickou stabilitu, umožní nastavení místních bilančních podmínek uspořádaných dvojic senzorů snímače v souladu s aktuálním „normálním“ zatížením soustavy při zachování citlivosti zapojení na vybrané dvojici blízké minoritní události, které se projeví aktuální přechodovou odchylkou od přednastavené výchozí rovnovážné úrovně signálu odezvy.



Obr. 6 Rozšířené bilanční zapojení pro aktivní výchozí nastavení

Oddělovací odpor $R_{\check{R}}$ se volí tak, aby $R_{\check{R}} \gg R_M$ a současně aby

$$\frac{U_{\check{R}} - U_{IN}}{R_{\check{R}}} > \frac{U_{IN+}}{R_{VSTUP+}}$$

Druhá z podmínek zaručuje úplnou kompenzaci vstupní asymetrie použitého reálného operačního zesilovače. První podmínka zaručí mimo žádané nastavení výchozí bilanční rovnováhy v blízkém okolí uspořádaných dvojic senzorů snímače v normálním pracovním zatížení monitorované soustavy také zachování dostatečné citlivosti zapojení na výskyt minoritních událostí také v době trvání přechodných dějů.

Dané zapojení bude v disponibilním rozsahu vykazovat citlivost na blízké události, jejichž aktivita bude srovnatelná s jednou polovinou maximálního disponibilního příkonu bilančního zapojení, tj.

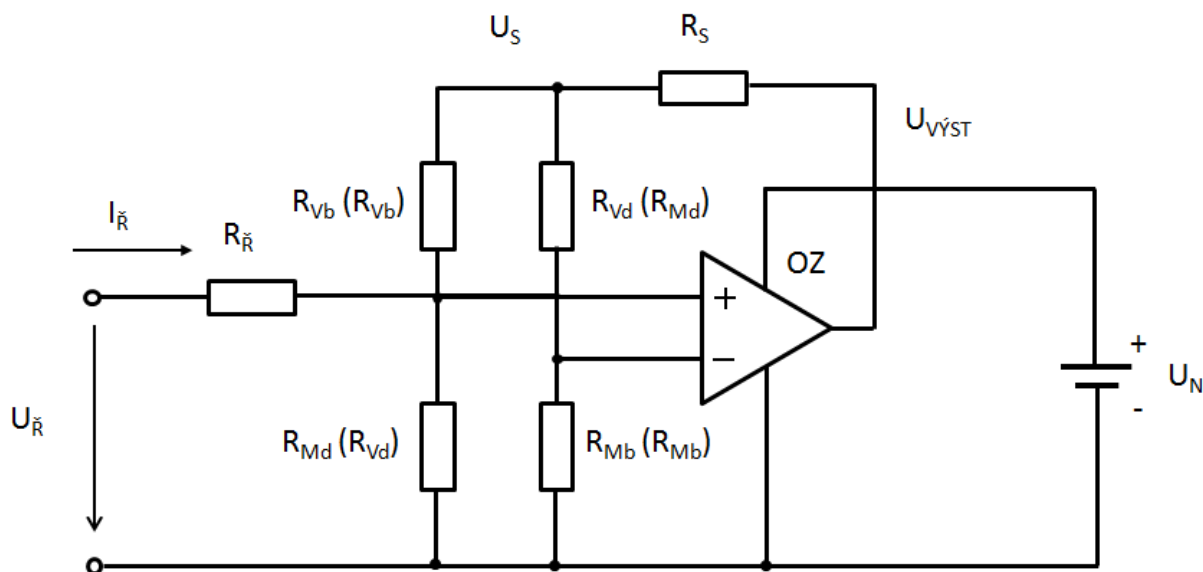
$$\frac{1}{4} \cdot \frac{U_{VYST}^2}{R_C}$$

R_C je aktuální celkový odpor snímače vůči bilančním zapojení dodávanému příkonu.

Pro případ velmi malých aktivit monitorované minoritní události se dá citlivost (dynamická úroveň odezvy) zvýšit výkonovým přizpůsobením.

3.2.2 Výkonové přizpůsobení reálné soustavy

Odvozená podmínka bilanční rovnováhy (4) platí pro napájecí svorky snímače. Výkonového přizpůsobení aktivitě monitorované minoritní události lze dosáhnout zařazením sériového odporu R_S mezi výstup operačního zesilovače a kladnou napájecí svorkou snímače podle Obr. 7.



Obr. 7 Rozšířené bilanční zapojení pro výkonové přizpůsobení

Bilanční podmínka (4) platí pro uspořádaným dvojícím senzorů snímače aktuální místní interakci. Velmi malé minoritní události jsou na hranicích s jejich bezprostředním okolím úspěšně kompenzovány malým potřebným příkonem snímače, který je v podobě užitečného signálu reprezentován napětím U_S přiloženým na svorky snímače. Je-li mezi ní a výstup operačního zesilovače zařazen „velký“ sériový odpor R_S , dosáhne bilanční zapojení obnovy hraniční bilanční rovnováhy významným navýšením napětí na výstupu operačního zesilovače. Dynamické změny na výstupu bilančního zapojení tak budou poměrem sériového odporu R_S a aktuálního celkového odporu snímače R_C násobně vyšší.

$$\frac{U_{VYST}}{U_S} = \frac{R_S + R_C}{R_C} = 1 + \frac{R_S}{R_C}$$

Podle výše uvedeného vztahu zvyšuje zařazení sériového odporu R_S dynamickou citlivost zapojení v poměru odporů R_S a R_C . Stejným poměrem se však zvýší také citlivost na změnu řídicího napětí U_R pro nastavení výchozí bilanční rovnováhy. Tato skutečnost může ovlivnit volbu R_R nebo zdroje řídicího signálu U_R .

V zapojeních s velmi vysokou citlivostí (vysoké hodnoty R_S) mají přirozeně vysokou citlivost nejen na minoritní monitorované události, ale také zvýšenou citlivost na potlačované majoritní pozadí. V takovém případě již nemusíme vystačit s prostým přednastavením výchozí bilanční rovnováhy „normálnímu“ provoznímu zatížení soustavy, ale je třeba zavést automatické přizpůsobení provozním podmínkám sledované soustavy.

3.2.3 Přínosy řešení dílčího cíle 2

Nově navržené bilanční zapojení pro snímač v uspořádání se čtyřmi senzory umožňuje aktivní nastavení výchozí bilanční rovnováhy a výkonové přizpůsobení senzoru jeho bezprostřednímu okolí v soustavě.

- Aktivní nastavení výchozí bilanční rovnováhy představuje obdobu nastavení výchozí rovnováhy trimrem v původním zapojení s tím, že její úroveň je závislá jen na velikosti řídicího napětí $U_{\bar{R}}$ a umožňuje tak zavedení další nezávislé externí zpětné vazby.
- Taková nezávislá zpětná vazba umožní v porovnání s původním zapojením nejen prosté nastavení statické úrovně rovnováhy, ale také její zpětnovazební řízení v závislosti na zpracování signálu aktuální odezvy.
- Výkonové přizpůsobení senzoru dynamice změn v jeho bezprostředním okolí umožňuje nastavení dynamické citlivosti odezvy zapojení.

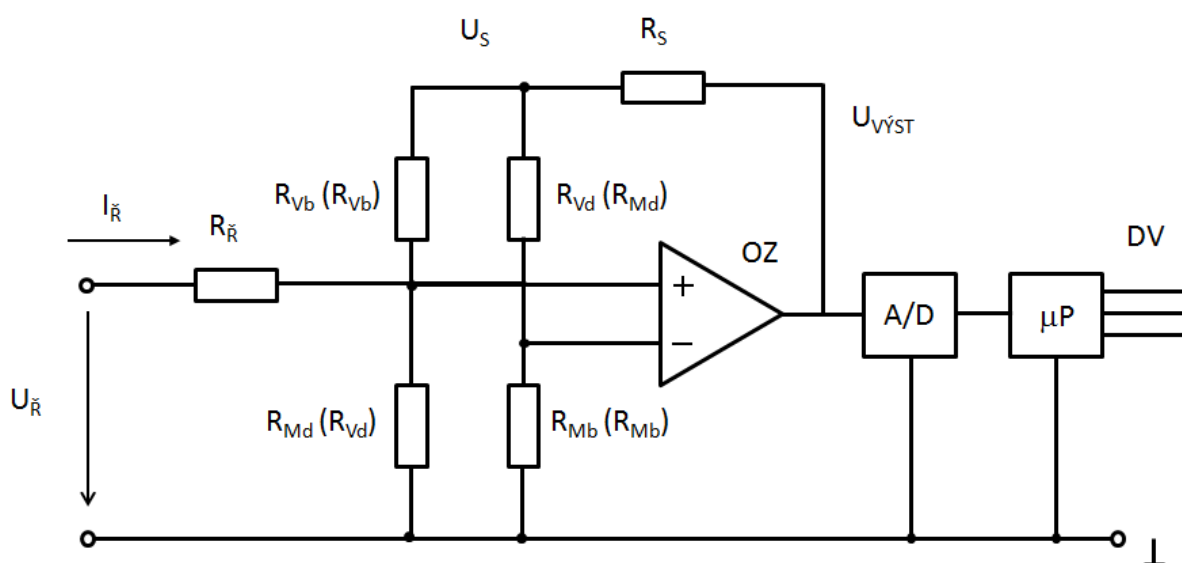
Nabytí takových vlastností představuje splnění druhého dílčího cíle práce naplněním očekávaných přínosů uvedenou změnou bilančního zapojení.

3.3 Automatické přizpůsobení provozním podmínkám

Vysoce citlivá bilanční zapojení mohou vykazovat zdánlivou dlouhodobou časovou nestabilitu základní (ustálené) úrovně výstupního signálu, která je zapříčiněna vyšší citlivostí také na jinak potlačované majoritní pozadí sledované soustavy v normálním pracovním zatížení. Změny majoritního pozadí však zpravidla probíhají s daleko vyšší časovou konstantou než monitorované minoritní události. V takovém případě se i na významném majoritním pozadí dají minoritní události odlišit zařazením numerického časového filtru v jednotce pro analýzu užitečného signálu.

Proto se v předešlém uvedená analogová část zapojení doplní AD převodníkem užitečného analogového signálu na numerickou hodnotu, která se v další výpočetní jednotce může zpracovávat prostředky pro numerickou analýzu. Toto řešení představuje třetí dílčí cíl práce.

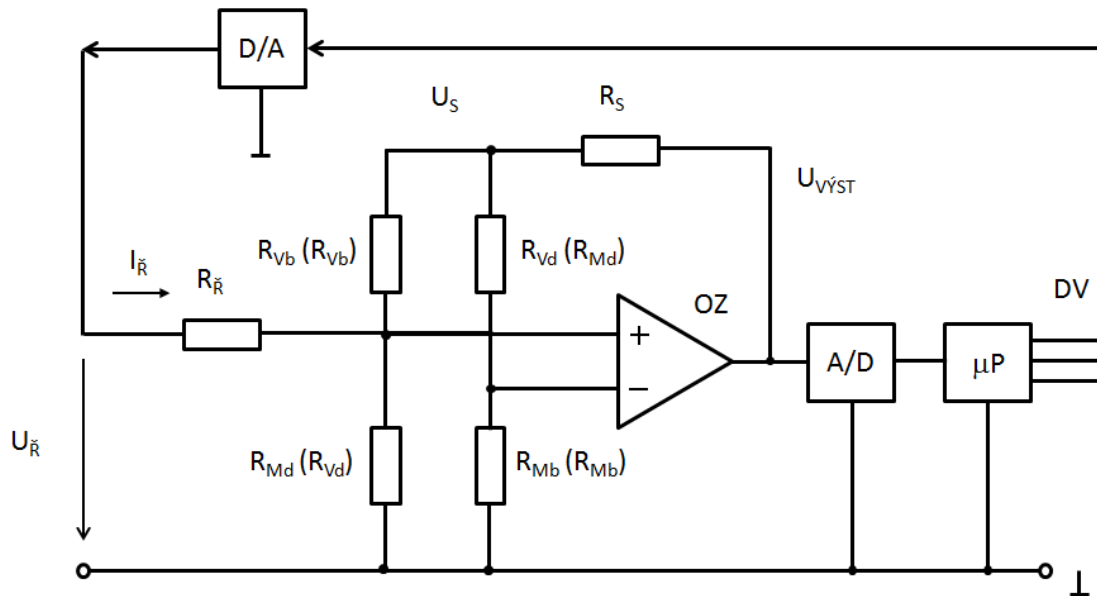
Zapojení rozšířené o funkční bloky nutné pro splnění výše uvedených požadavků je znázorněno na Obr. 8.



Obr. 8 Rozšíření vbilančního zapojení pro signálovou analýzu odezvy

Uvedené rozšíření zapojení umožní využití široké škály numerických výpočetních rutin a prostředků signálové analýzy jako prostředku pro odlišení různých složek užitečného signálu odezvy včetně odvození logických, numerických a zobrazovacích funkcí. Vybrané z nich lze následně použít ke zpětnému řízení (ovlivňování) stavu soustavy, nebo nastavení analogové části zapojení. Pro aplikace s citlivými bilančními zapojeními nabývá na významu zejména funkce zpětnovazebního řízení nastavení výchozí bilanční rovnováhy prostřednictvím změny řídicího napětí $U_{\bar{R}}$.

Příklad takového uspořádání je patrný z Obr. 9.



Obr. 9 Rozšířené bilanční zapojení s automatickým přizpůsobením

Typickým zpětnovazebním numerickým algoritmem využitelným v aplikacích s bilančním zapojením je časově zpožděná stabilizace nastavené základní bilanční rovnováhy, která zvyšuje odlišitelnost rychlých minoritních událostí na výrazném a pomalém pozadí potlačovaných majoritních dějů.

K aktuální odezvě v číselné reprezentaci se navíc průběžně pomocí numerického filtru s velkou časovou konstantou generuje jeho dlouhodobě střední hodnota, jejíž úroveň se přes zpětnovazební smyčku s D/A převodníkem udržuje na zadané stálé úrovni. Rozdíl skutečného aktuálního a dlouhodobě středního signálu je věrohodnějším ukazatelem monitorovaných rychlých minoritních událostí v blízkém okolí instalovaných senzorů snímače. Celé bilanční zapojení tím nabývá na dlouhodobé stabilitě. Toto řešení bylo realizováno jednotkou s označením ADAM.

Příklad numerické rutiny automatického přizpůsobení provozním podmínkám (tzn. změnám majoritního pozadí) se zachováním dynamické citlivosti na monitorovanou minoritní událost je v matematickém vyjádření založen na:

- Inicializační definici požadavku na střední úroveň odezvy a časového zpoždění řídicího napětí pro její znovuoobnovení.
- Vlastním výpočtu úrovně řídicího napětí pro udržení skutečné odezvy na požadované úrovni.

Inicializační část definuje parametry rutiny a lze je v matematickém vyjádření psát jako:

$$U_{sig}^{stř} = konst.$$

$n =$ nenulové celé kladné číslo

$U_{sig}^{stř}$ je požadovaná střední hodnota úrovně signálu odezvy a n je časové zpoždění řídicího signálu pro nastavení, nebo znovuoobnovení přednastavené bilanční rovnováhy, vyjádřené počtem opakování cyklu výpočetní rutiny.

Vlastní výpočtovou část rutiny v aktuálním výpočtovém kroku (k) lze napsat jako:

$$U_{sig}^{stř}(k) = \frac{nU_{sig}(k-1) + U_{sig}(k)}{n+1}$$

$$U_{\check{R}}(k) = K(U_{sig}^{stř} - U_{sig}^{stř}(k))$$

To zaručuje:

- Dostatečně rychlé výchozí nastavení požadované (střední) úrovně výstupního napětí (zhruba v n -tém kroku).
- Její znovuoobnovení po předchozí změně majoritního pozadí opět během cca (n) výpočetních kroků a to ať už jeho vliv nadále přetrvává, nebo byl jen přechodný.

3.3.1 Přínosy řešení dílčího cíle 3

Navržená nezávislá zpětnovazební jednotka se vstupním AD převodníkem, mikroprocesorovou výpočetní jednotkou a výstupním DA převodníkem umožňuje měření výstupní odezvy bilančního zapojení, její převod na číselnou podobu, číselnou analýzu, algoritmické zpracování jejích výsledků a vygenerování zpětnovazebního řídicího signálu v souladu s předem stanovenými podmínkami a předpisem pro úpravu podmínek rovnováhy.

Navržený princip programovatelné zpětnovazební jednotky umožňující automatické přizpůsobení pomalým změnám statických podmínek při zachování vysoké dynamické citlivosti bilančního zapojení představuje splnění dílčího cíle práce naplněním očekávaných přínosů. Jednotka byla realizována a testována ve vybraných aplikacích.

4 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo nalezení způsobu odlišení nepatrných teplotních jevů v termodynamických soustavách na velmi výrazném pozadí stavu soustavy jako celku. Na základě rozboru výhod a nevýhod známého řešení, které využívá způsobu monitorování pomocí jednoduchého termodynamického snímače v bilančním zapojení, jsem stanovil několik dílčích cílů, jejichž úspěšným řešením bylo možné předpokládat naplnění hlavního cíle.

Prvním dílčím cílem bylo nalezení nového uspořádání termodynamického snímače, které by umožňovalo práci v širším rozsahu pracovních zatížení soustavy bez ztráty citlivosti. Počet teplotních senzorů snímače instalovaných v monitorované soustavě jsem navýšil z původních

dvou na čtyři. Pro takové uspořádání jsem nově odvodil bilanční podmínku stability, hraniční výkonové interakce, výchozí model pro diskretizaci soustavy a základní simulaci odezvy a přechodných dějů. Dále pak bylo nutné navrhnout a realizovat fyzické uspořádání snímače a bilančního zapojení za účelem ověření.

Novým uspořádáním bylo dosaženo stavu, kdy je ustavení bilanční rovnováhy závislé mimo aktuálního stavu soustavy již pouze na TCR použitých senzorů snímače. Dalším významným přínosem je významné potlačení vlivu majoritního pozadí (událostí) v důsledku přechodu od jeho absolutního k diferenciálnímu uplatnění. Tím bylo dosaženo splnění prvního dílčího cíle.

Druhým dílčím cílem bylo zdokonalení bilančního zapojení a jeho adaptace novému uspořádání snímače. Zpětnovazební část bilančního zapojení byla doplněna prvkem umožňujícím zvyšování citlivosti odezvy na dynamické změny v bezprostředním okolí snímače a jeho vstupní část doplněna o prvek pro nastavení výchozí úrovně bilanční rovnováhy nezávislým řídicím napětím.

Hlavním přínosem nového bilančního zapojení je možnost zavedení další nezávislé externí zpětné vazby, která kromě samotného nastavení umožňuje případné nezávislé řízení základní úrovně bilanční rovnováhy, tedy střední úrovně výstupního signálu odezvy. Tato vlastnost je základním předpokladem pro následnou realizaci potřebného adaptivního přizpůsobení reálnému (majoritnímu) stavu soustavy. Dalším přínosem je možnost výkonového přizpůsobení dynamice (minoritních) změn v bezprostředním okolí snímače s přímým vlivem na možnost nastavení citlivosti zapojení na monitorované minoritní události. Tím bylo dosaženo splnění druhého dílčího cíle.

Třetím dílčím cílem byl návrh řídicí jednotky pro automatické přizpůsobení podmínek interakce v závislosti na aktuálním zatížení monitorované soustavy. Navržená jednotka sestává ze vstupního AD převodníku, mikroprocesorové výpočetní jednotky a výstupního DA převodníku. Takto navržené blokové uspořádání bylo profesionálně realizováno ve společnosti HIT s.r.o. pro potřeby celé řady mikroelektronických aplikací.

Její hlavním přínosem je to, že umožňuje měření výstupní odezvy bilančního zapojení, její převod na číselnou podobu, číselnou analýzu, algoritmické zpracování jejích výsledků a vygenerování zpětnovazebního řídicího signálu v souladu s předem stanovenými podmínkami a předpisem pro úpravu podmínek rovnováhy. Tím bylo dosaženo splnění třetího dílčího cíle.

Díky spolupráci na výzkumných projektech BASEMO a NOMEN, na kterých se VUT v Brně společně s HIT s.r.o. v posledních několika letech aktivně podílelo, bylo možné navržená řešení uplatnit v celé řadě různorodých aplikací s dobrým technologickým potenciálem. Navržené řešení bylo každé ze širokého spektra realizovaných aplikací přizpůsobeno tak, aby byly naplněny konkrétní požadavky cílového uživatele v konkrétních provozních podmínkách. U aplikace pro indikaci rozvoje přetržení tažených skleněných vláken je uveden podrobný popis problematiky, způsob řešení a dosažené výsledky. U zbylých aplikací jsou z důvodu rozsahu této práce uvedeny jen dosažené výsledky testů.

Splnění hlavního cíle této disertační práce, kterým bylo nalezení způsobu odlišení nepatrných teplotních jevů v termodynamických soustavách na velmi výrazném pozadí stavu soustavy, je doloženo výsledky těchto testů.

Přetrvávajícím problémem v souvislosti se snahou o praktické nasazení termodynamického monitoringu, zejména při sledování minoritních událostí, je obecně spíše jen povrchní znalost podstaty a podmínek průběhu procesů na jednotlivé pracovní pozici ze strany samotného uživatele. Ten se soustředil výhradně na poznání podstaty a podmínek majoritních procesů, které byl doposud schopen identifikovat a řídit. Systém monitorování nově

identifikovaných minoritních událostí umožňují registrovat jejich výskyt, posléze však musí následovat poznání a identifikace příčin jejich výskytu. Teprve to umožní realizaci technických opatření k omezení četnosti jejich výskytu a nežádoucího vlivu na výtěžnost technologických procesů.

Výsledky dosažené během řešení jednotlivých cílů této práce byly kontinuálně publikovány mimo jiné na následujících mezinárodně uznávaných konferencích: 32nd International IMAPS-IEEE CPMT 2008 Poland Conference [18], 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology Brno ISSE 2009 [21], EMPC2009 17th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition. Rimini [22], Electronics System Integration Technology Conference ESTC 2010 in Berlin [23].

Vlastní autorský podíl na stěžejních uvedených publikacích se pohybuje na úrovni 70%. Při jejich zpracování jsem využil podklady a rady uvedených spoluautorů.

5 Literatura

- [1] KALČÍK, J.; Technická termodynamika, Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1963, 568 str., ISBN 21-126-63.
- [2] KHEILOVÁ, M.: Termodynamika (druhé vydání), VUTIUM 1998, ISBN 80-214-0997-Z-193
- [3] The Temperature Handbook, Handbooks and Encyklopedia for 21 Century, Omega Engineering Inc., 2000, Z-249-Z-260, Z-186-Z-193
- [4] THONG, A.; Improving The Accuracy of Temperature Measurements, Sensor Review, Volume 21, No. 3, 2001, pp.193 – 198, ISSN: 0260-2288
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [6] BENEDICT, Robert P. Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements: measurement and scientific progress. 3rd ed. New York: Wiley, c1984, xx, 532 p. ISBN 04-718-9383-8.
- [7] HIT S.R.O., Interní výzkumné materiály, Poměrová měřicí technika, 2001-2004
- [8] HIT S.R.O., Interní výzkumné materiály, Termodynamická sensorika, 2005-2008
- [9] REZNICEK, Z., TVAROZEK, V., RALL, D. A New RTD Concept and Design for Easy Laser Trimming and Greater Accuracy, The ISA 47th IIS, Denver Southeast, USA, May 9-10, 2001, #1016
- [10] TVAROZEK, V., VAVRINSKY, E., REZNICEK, Z.; Novel approach in ratiometric technique of sensing, Journal of Electrical Engineering, vol. 58, 2007, 2, 98-103
- [11] ABB INSTRUMENTATION. High-Precision Differential Temperature Measurement for Heat Balancing: Instrumentation Solutions AG/PC102-EN. Fed. Rep. of Germany, 2010, 8 s. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/dc2af24b02b22ad3c12576c10035e659/\\$file/ag_pc102-en-02_2010.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot211.nsf/veritydisplay/dc2af24b02b22ad3c12576c10035e659/$file/ag_pc102-en-02_2010.pdf)
- [12] MÜLLER, R. H. a H. J. STOLTEN. Use of Thermistors in Precise Measurement of Small Temperature Differences. Analytical Chemistry. 1953, vol. 25, issue 7, s. 1103-1106. DOI: 10.1021/ac60079a029. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60079a029>

6 Vlastní publikace

- [13] REZNICEK, Z., TVAROZEK, V., SZENDIUCH, I., REZNICEK, M., Temperature balanced process media energy activity monitoring, EDS-05, IMAPS-CS International Conference, Brno, 2005, 94-100, ISBN 80-214-2990-9
- [14] ŘEZNÍČEK, M., *Process energy balance monitoring*, Student EEICT 2005, 2005, ISBN 80-214-2888-0

- [15] REZNICEK, Z., TVAROZEK, V., SZENDIUCH, I., REZNICEK, M., Hybrid constant temperature regulator, EUROSIME 2006, 7th International Conference, Como, Italy, 2006, 502-505, ISBN 1-4244-0275-1
- [16] SZENDIUCH, I.; ŘEZNÍČEK, M.; ŘEZNÍČEK, Z. Thick Film Sensor for Temperature Balanced Process Monitoring. In Proceedings IMAPS 2007. San Jose, IMAPS USA. 2007. p. 250 - 1269. ISBN 0-930815-82-3.
- [17] ŘEZNÍČEK, Z., 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
- [18] ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I. Thick Film Sensor Based on New Principle of Balanced Process Monitoring. In 32nd International IMAPS-IEEE CPMT Poland Conference. Polsko, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. 2008. p. 1 - 365. ISBN 978-83-917701-6-0.
- [19] ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I.; ŘEZNÍČEK, Z. Thick Film Double Thermodynamic Sensor System. In ESTC 2008 2nd Electronics System-Integration Technology Conference 1st-4th September 2008, Greenwich, London, UK. Anglie. 2008. p. 1301 - 1304. ISBN 978-1-4244-2813-7.
- [20] ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I.; BURŠÍK, M.; ŘEZNÍČEK, Z.; HEJÁTKOVÁ, E. Termodynamická sensorika - Nový pohled na monitorování termodynamických systémů - část 2. Brno, NOVAPRESS s.r.o. 2008. p. 1 - 17.
- [21] ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I.; ŘEZNÍČEK, Z. Segmented Thermodynamic Sensor in Applications. In 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology Abstract Proceedings. 1. Brno. 2009. p. 56 - 60. ISBN 978-1-4244-4260-7.
- [22] ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I.; ŘEZNÍČEK, Z. Bisected Thermodynamic Sensor as the Power AC/DC Transmitter. In EMPC2009 17th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition. Rimini. 2009. p. 33 - 37. ISBN 978-1-4244-4722-0.
- [23] ŘEZNÍČEK, M.; SZENDIUCH, I. Thermodynamic Sensors New Opportunities for Measuring and Control in Industrial Applications. In Electronics System Integration Technology Conference ESTC 2010 in Berlin. 1. Berlin, Německo. 2010. p. 1 - 5. ISBN 978-1-4244-8555-0.

Curriculum Vitae

Name: Michal ŘEZNÍČEK

Born: April 20th 1983 in Uherské Hradiště

Contact: reznicek@feec.vutbr.cz, reznicekm@gmail.com

Education

- 2002 – 06 **Technical University of Brno / Department of Microelectronics**
Bachelor study of Microelectronics and Technology
State exam passed in *June 1991*
Bachelor thesis Micro heater for bio-sensor technology
- 2006 – 08 **Technical University of Brno / Department of Microelectronics**
Master study of Microelectronic
State exam passed in *November 1993*
Diploma thesis Optimized thermo-dynamic sensor with balance princip
- 2008 – 14 **Technical University of Brno / Department of Microelectronics**
Ph.D. study of Microelectronics and Technology
State exam passed in June 2010

Experience

- from 2002 **HIT, s.r.o.**
study stay, R&D
analysis and design of thermodynamic sensors for industrial applications

Languages

Czech, English