

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T041 Stavba jaderně energetických zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální určení časové konstanty smyčkového RTD

JE Temelín

Autor: **Bc. Lukáš TOLAR**

Vedoucí práce: **Ing. Kateřina Bílá, Ph.D.**

Akademický rok: 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických strojů a zařízení

Akad. rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Lukáš Tolar

Osobní číslo: 16N0100P

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Stavba jaderně energetických zařízení

Název tématu: **Experimentální určení časové konstanty smyčkového RTD JE**

Temelín

Zásady pro vypracování:

Na experimentálním pracovišti v ÚJV Řež určit časové konstanty několika vybraných smyčkových odporových teploměrů (RTD). Tyto teploměry budou následně umístěny do provozu na JE Temelín a jejich časová konstanta opět určena neinvazivní šumovou metodou.

Osnova diplomové práce:

1. Teoretický úvod
 - a. Popis významu smyčkových RTD v rámci JE
 - b. Rešerše přístupu na ostatních JE ve světě
 - c. Popis metod určení pro časové konstanty (Plunge test, LCSR, Noise)
2. Popis experimentu (případně návrhy k vylepšení)
3. Vývoj měřicího SW pomocí NI LabView
4. Vývoj skriptů pro určení časové konstanty z naměřených dat
5. Provedení několika experimentů a jejich vyhodnocení

Rozsah grafických prací: 0 stran, není vyžadováno

Rozsah kvalifikační práce: 50 – 70 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Hashemian H. M.: Measurement of Dynamic Temperatures and Pressures in Nuclear Power Plants, University of Western Ontario 2011. Electronic Thesis and Dissertation Repository, Paper 189.
2. Carlos dos Santos R., (1; 2) Pereira I. M.: Time Response of Temperature Sensors Using Neural Networks, International Nuclear Atlantic Conference, Rio de Janeiro, 2009.
3. Montalvo C., García-Berrocal A.: Improving the in situ measurement of RTD response times through Discrete Wavelet Transform in NPP, In Annals of Nuclear Energy, Volume 80, 2015, Pages 114-122, ISSN 0306-4549.
4. Hashemian H. M., Jiang J.: Nuclear plant (3) (4) temperature instrumentation, In Nuclear Engineering and Design, Volume 239, Issue 12, 2009, Pages 3132-3141, ISSN 0029-5493.
5. Lamarsh J. R., Baratta A. J.: Introduction to Nuclear Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 2001.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Kateřina Bílá, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Hanuš

Datum zadání diplomové práce: 20. 10. 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 21. 5. 2018 (L.S.)

děkan

vedoucí katedry

V Plzni dne

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a řádně citoval všechny použité prameny a literaturu a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

V Plzni dne 11. května 2018

Lukáš Tolar

Poděkování:

Poděkování patří vedoucí diplomové práce paní Ing. Kateřině Bílé, Ph.D. za ochotnou a přínosnou pomoc při tvorbě diplomové práce.

Stejně poděkování bych vyjádřil svému konzultantovi panu Ing. Jiřímu Hanušovi a také panu Ing. Martinu Bémovi (oba ÚJV Řež) za velmi cenné profesionální rady, připomínky, poskytnuté publikace, dokumenty či ilustrace týkající se daného tématu a především za poskytnutí odborných konzultací během tvorby diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Tolar	Jméno Lukáš	
STUDIJNÍ OBOR	2302T041: Stavba jaderně energetických zařízení		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Bílá, Ph.D.	Jméno Katerina	
PRACOVNÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Experimentální určení časové konstanty smyčkového RTD JE Temelín		

FAKULTA	STROJNÍ	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	73	TEXTOVÁ ČÁST		GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	----	---------------------	--	----------------------	--

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce obsahuje teoretický úvod týkající se měření teploty pomocí smyčkového RTD na primárním okruhu jaderné elektrárny, zejména jeho dynamických vlastností, tedy časové konstanty. Dále jsou popsány základní metody k určení časové konstanty.</p> <p>Praktická část se zabývá experimentálním určením časové odezvy RTD umístěného na ETE pomocí metody testu ponořením, jenž byl proveden v laboratoři ÚJV Řež a následně pomocí šumové analýzy. Dále byl v programu Labview navržen měřicí software a v programu Gnuplot byly navrženy skripty, které určí z experimentálních dat časovou odezvu.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>časová konstanta, dynamické vlastnosti RTD, teplota, odporový teploměr, jaderná elektrárna, primární okruh, test ponořením, šumová analýza, NI LabView, Gnuplot</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Tolar	Name Lukáš	
FIELD OF STUDY	2302T041: Construction of Nuclear Power Equipment		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Bílá, Ph.D.	Name Kateřina	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Experimental Determination of Time Constant for Circular RTD of the Temelín Nuclear Power Plant		

FACULTY OF	Mechanical Engineering	DEPARTMENT OF	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2018
-------------------	------------------------	----------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	73	TEXT PART		GRAPHICAL PART	
----------------	----	------------------	--	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This thesis is divided into two parts: theoretical and practical. The theoretical part is a search dealing with measurement of temperature on primary circuit of nuclear power plant using RTD. This part is especially focused on dynamic properties of RTD. Within these search the methods for determination time constant are described.</p> <p>The practical part includes the calculation of time response for RTD used at Temelín Nuclear power plant using the plunge test and noise analysis. The software for measuring was programmed using NI LabView and the script for evaluation of time response was developed from obtained experimental data.</p>
KEY WORDS	Time Constant, Dynamic Properties of RTD, Temperature, Resistance Thermal Detector, Nuclear Power Plant, Primary Circuit, Plunge test, Noise Analysis, NI LabView, Gnuplot

Obsah

Seznam veličin a jednotek.....	10
Seznam grafů.....	11
Seznam tabulek.....	11
Seznam obrázků.....	11
Seznam zkratk.....	13
Úvod.....	14
1. Regulace jaderného bloku s tlakovodním reaktorem.....	15
1.1. Určení tepelného výkonu jaderného reaktoru.....	17
1.2. Regulační režimy jaderného bloku s tlakovodním reaktorem.....	18
2. Měření provozních parametrů na I.O. tlakovodních jaderných elektrárn.....	20
2.1. Měření teplot na primárním okruhu tlakovodních jaderných elektrárn.....	20
2.2. Měření teplot na primárním okruhu VVER 1000.....	21
3. Měření teploty pomocí RTD.....	25
3.1. Odporový kovový snímač teploty.....	25
3.2. Měřicí řetězec.....	29
4. Časová konstanta RTD.....	31
4.1. RTD popsany diferenciální rovnicí 1. řádu.....	31
4.2. RTD popsany diferenciální rovnicí vyšších řádů.....	33
5. Ovlivnění časové konstanty.....	36
5.1. Řádné uložení RTD do ochranné jímky.....	36
5.2. Vliv součinitele přestupu tepla média.....	37
5.3. Vliv teploty.....	38
5.4. Stárnutí RTD.....	39
5.5. Vliv měřicího řetězce.....	40
6. Metody určování časové konstanty.....	41
6.1. Dynamické vlastnosti měřících přístrojů.....	41
6.2. Test ponořením.....	44
6.3. LCSR test.....	49
6.4. Šumová analýza.....	50
6.5. Metody používané ve světě.....	55
7. Experimentální určení časové konstanty RTD pomocí testu ponořením.....	57

7.1.	Měření.....	57
7.2.	Vyhodnocení.....	60
8.	Experimentální určení časové konstanty RTD pomocí šumové analýzy	65
8.1.	Měření.....	65
8.2.	Vyhodnocení.....	67
9.	Srovnání výsledků dle použitých metod.....	71
10.	Závěr.....	72
11.	Bibliografie	73

Seznam veličin a jednotek

NÁZEV VELIČINY	JEDNOTKA	
	ZNAČKA VELIČINY	
teplota	T	°C
tlak	p	Pa
tepelný výkon	N_t	W
součinitel tepelné vodivosti	λ	W/(m · K)
součinitel prostupu tepla	k	W/(m ² · K)
součinitel přestupu tepla	α	
entalpie	h	J/kg
hmotnostní průtok	\dot{m}	kg/s
plocha	S	m ²
objem	V	m ³
hustota	ρ	kg/ m ³
měrná tepelná kapacita	c	J/kg K
rychlost	w	m/s
poloměr	r	m
charakteristický rozměr	L	m
čas	τ	s
frekvence	f	Hz
modální časové konstanty	$\tau_1 \dots \tau_n$	s
úhlová frekvence	ω	rad/s, s ⁻¹
časová konstanta	τ_ε	s
elektrické napětí	U	V
elektrický proud	I	A
Nusseltovo podobnostní číslo	Nu	-
Reynoldsovo podobnostní číslo	Re	-
Prandtlovo podobnostní číslo	Pr	-
elektrický odpor	R	Ω
kapacita	C	F
kinematická viskozita	ν	m ² /s
teplotní součinitelé odporu	β, γ	K ⁻¹

Seznam grafů

Graf 1: Přejchodová charakteristika RTD – napětí.....	59
Graf 2: Přejchodová charakteristika RTD – teplota.....	60
Graf 3: Fit přechodové charakteristiky	61
Graf 4: Stanovení doby náběhu T_n a doby průtahu T_u	62
Graf 5: Určení t_1 a $y(t_2)$	63
Graf 6: Tepelný šum RTD.....	66
Graf 7: Spektrální výkonová hustota RTD.....	67
Graf 8: Hustota pravděpodobnosti tepelného šumu (histogram).....	67
Graf 9: Fit PSD	69

Seznam tabulek

Tab. 1: Typické charakteristiky RTD používaných na jaderných elektrárnách	28
Tab. 2: Modální časové konstanty – test ponořením	61
Tab. 3: Modální časové konstanty – test ponořením (Strejcova metoda).....	64
Tab. 4: Modální časové konstanty – šumová analýza.....	69
Tab. 5: Porovnání výsledných časových konstant	71

Seznam obrázků

Obr. 1: Základní měření a akční členy jaderného bloku s tlakovodním reaktorem [5]	16
Obr. 2: Regulace na konstantní střední teplotu primárního chladiva [6]	18
Obr. 3: Regulace na konstantní tlak v hlavním parním kolektoru [6]	19
Obr. 4: Rozmístění RTD na I.O. horké smyčky PWR.....	21

Obr. 5: Primární okruh VVER 1000	22
Obr. 6: Schéma rozložení RTD na studených větvích VVER 1000.....	23
Obr. 7: Schéma rozložení RTD na horkých větvích VVER 1000.....	23
Obr. 8: Vzdálenost RTD od tlakové nádoby reaktoru (VVER 1000).....	24
Obr. 9: Schéma krystalové mřížky s volnými elektrony.....	25
Obr. 10: Závislost odporu na teplotě některých kovů.....	26
Obr. 11: Odporové čidlo teploty	27
Obr. 12: RTD	27
Obr. 13: RTD v ochranné jímce umístěné v I.O	28
Obr. 14: Čtyřvodičové zapojení odporového snímače	30
Obr. 15: Přenos tepla: jednoduchý systém	32
Obr. 16: Přenos tepla – složený systém	33
Obr. 17: Vliv uložení RTD do ochranné jímky na časovou odezvu snímače	36
Obr. 18: Závislost součinitele přestupu tepla na časové odezvě snímače.....	37
Obr. 19: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě	38
Obr. 20: Závislost velikosti teploty na časové konstantě RTD	39
Obr. 21: Degradace dynamických vlastností RTD vlivem provozu na I.O. JE.....	40
Obr. 22: Určení časové konstanty RTD	41
Obr. 23: Používané vstupní signály	42
Obr. 24: Přenos systému.....	43
Obr. 25: Princip testu ponořením.....	45
Obr. 26: Princip LCSR testu.....	50
Obr. 27: Bílý šum.....	51
Obr. 28: Převodění výstupního časového signálu do spektrální výkonové hustoty	51

Obr. 29: Vztah mezi $G(\omega_i)$ a PSD	52
Obr. 30: Určení časové konstanty – jednoduchý systém	53
Obr. 31: Fit spektrální výkonové hustoty	54
Obr. 32: Přesnost výsledku v závislosti na vstupním signálu – šumová analýza	55
Obr. 33: Měřicí software – NI LabView	57
Obr. 34: Pracoviště ÚJV Řež a.s. – test ponořením	58
Obr. 35: Schéma zapojení – test ponořením	59
Obr. 36: Strejcová tabulka	63
Obr. 37: Zpracování signálu - šumová analýza	65

Seznam zkratk

AZ aktivní zóna

ETE jaderná elektrárna Temelín

I.O. primární okruh

II.O. sekundární okruh

JE jaderná elektrárna

LCSR loop current step response (odezva na skok vnitřním elektrickým proudem)

PSD power spectrum density (výkonová spektrální hustota)

PWR pressurized water reactor (tlakovodní reaktor západního typu)

RTD resistance thermal detector (odporový teploměr)

VVER vodo-vodní energetický reaktor (tlakovodní reaktor ruského typu)

Úvod

Měření charakteristických veličin v jaderných elektrárnách je z hlediska bezpečnosti klíčovým faktorem. Měření musí být přesné a s rychlou odezvou, poněvadž hodnoty měřených veličin se dále zpracovávají a vstupují například do regulačních či bezpečnostních systémů. Jedna z důležitých veličin charakterizujících stav jaderného reaktoru je teplota na jednotlivých smyčkách primárního okruhu. Teploty se měří pomocí odporových teploměrů (resistance thermal detector, RTD), které musí mít výborné statické i dynamické vlastnosti.

Časová konstanta reflektuje zpoždění odezvy teploměru způsobené tepelnou setrvačností. Existuje několik faktorů, jež ovlivňují velikost časové konstanty. Tyto faktory je potřeba znát a vzít na zřetel při určování dynamických vlastností teploměrů.

Dynamické vlastnosti RTD vybraného pro měření na smyčce primárního okruhu jaderných elektráren musí být nejdříve před použitím ověřeny. Současná metoda pro určení časové konstanty se provádí tzv. testem ponořením, který se provádí v laboratorních podmínkách. Dále dynamické charakteristiky přístroje musí být ověřovány v pravidelných intervalech, tak aby bylo zaručeno, že časová konstanta během celého provozu přístroje má akceptovatelnou hodnotu. Z tohoto důvodu se využívají tzv. neinvazivní metody, které umožňují vyhodnotit dynamické vlastnosti, aniž by byl RTD vyjmut z ochranné jímky v primárním okruhu jaderné elektrárny a aniž by bylo třeba čekat na pravidelné odstávky. Další výhodou těchto neinvazivních metod je, že odráží vliv provozních podmínek na dynamické vlastnosti RTD. Jednou z neinvazivních metod je šumová analýza.

Diplomová práce kromě teoretické rešerše obsahuje také praktickou část věnovanou měření časové konstanty vybraného RTD, který byl následně vložen na smyčku primárního okruhu jaderné elektrárny Temelín. V laboratoři ÚJV Řež bylo v první etapě provedeno měření pro určení časové konstanty RTD pomocí testu ponořením. V programu NI LabView byl vytvořen měřící řetězec, který vyhodnotil výstupní signál z RTD. Ze získaných experimentálních dat byla určena časová konstanta.

Dále byl RTD vložen do smyčky primárního okruhu jaderné elektrárny Temelín, kde bylo provedeno měření teploty RTD za provozu. Pomocí metody šumové analýzy byla vyhodnocena dynamická charakteristika RTD.

Pro vyhodnocení časové konstanty stanovené pomocí testu ponořením a pomocí šumové analýzy byly v programu Gnuplot vyvinuty skripty.

1. Regulace jaderného bloku s tlakovodním reaktorem

Jaderná elektrárna transformuje různé druhy energie. V jaderném reaktoru se jaderná energie uložená v jaderném palivu přeměňuje převážně na tepelnou energii. Tepelná energie je pomocí primárního chladiva odvedena do výměníků tepla (tzv. parogenerátorů), kde je teplo předáno sekundárnímu chladivu. V parogenerátorech se na sekundární straně generuje pára, která posléze vstupuje do parní turbíny, kde se prostřednictvím mechanické energie transformuje elektrická energie na generátoru [5].

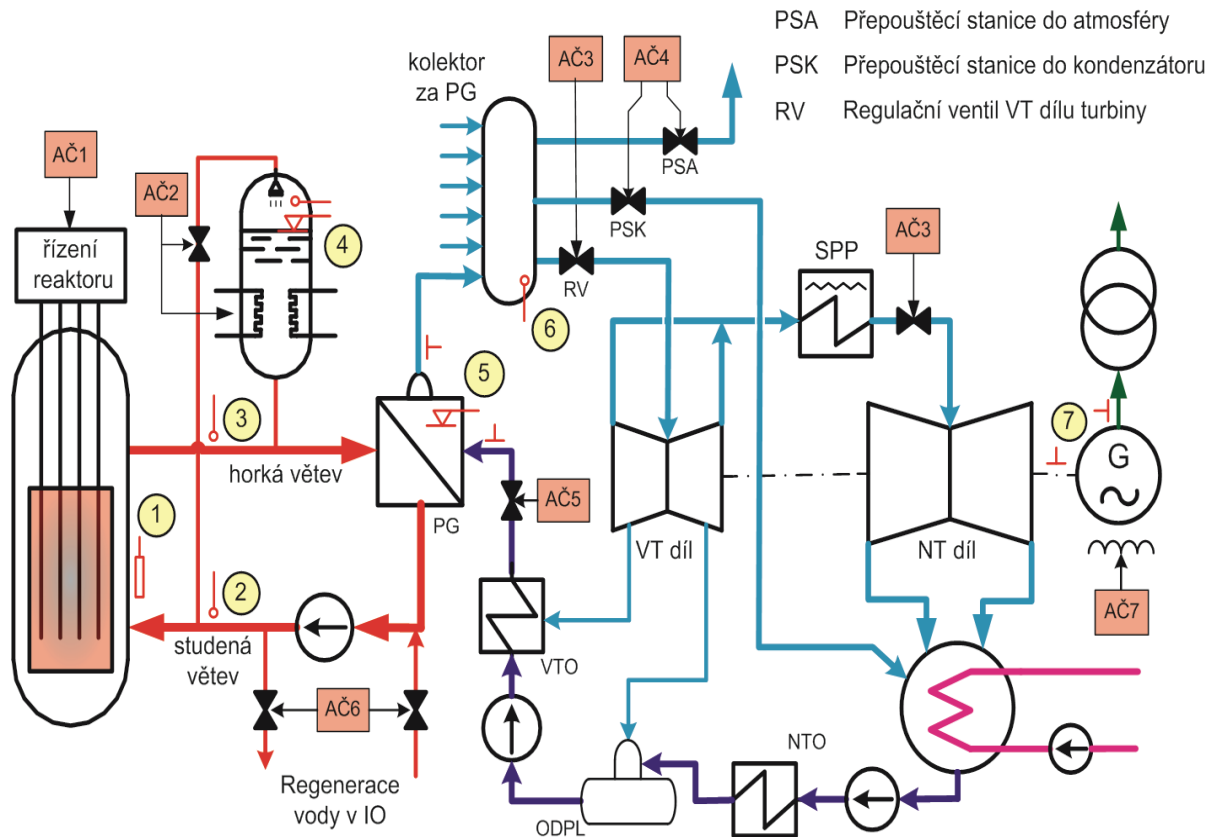
S bezpečným chodem reaktoru souvisí dodržování jeho provozních parametrů především tlaku, průtoku a teploty chladiva včetně omezení rychlosti jejich změn (teplotní pnutí, vodní rázy, zpětné vazby na reaktivitu atd.). Zajistit rovnováhu výkonové i hmotnostní bilance elektrárny od reaktoru po turbínu, a při tom udržovat provozní parametry bloku v příslušných provozních tolerancích mají za úkol hlavní blokové regulační obvody spolu s regulačními obvody navazujících technologií a jejich automatikami. Mezní hodnoty provozních parametrů jsou stanoveny tak, aby s určitou rezervou (s ohledem na dynamické stavy) nezasahovaly do pásma limitačních systémů a nezpůsobily bezdůvodné zásahy ochranných systémů (tzv. bezpečné poruchy) [5], [6].

Při všech normálních provozních režimech, jak stacionárních tak přechodových, musí řídicí systém zajistit požadovanou rovnováhu mezi výkonem generovaným reaktorem a výkonem odebraným sekundárním okruhem a předaným elektrizační soustavě.

Jaderná elektrárna klade vzhledem ke své výjimečnosti zvýšené nároky na řídicí systémy oproti většině ostatních provozů. Řídicí systém lze z hlediska jeho funkce rozdělit do těchto skupin [5]:

- regulační systém,
- systém měření a kontroly,
- bezpečnostní a ochranný systém (havarijní systém),
- informační systém,
- systém logických obvodů a automatů,
- pomocné systémy.

Pro znalost aktuálního stavu systému a schopnost jeho řízení je nutné znát základní provozní parametry získané pomocí měřících členů a mít k dispozici dostatek akčních členů, kterými je možné provozní parametry řídit. Primární i sekundární okruh jsou protkány stovkami čidel a měřících přístrojů poskytující obsluze aktuální hodnoty neutronového toku, teploty, tlaku, průtoku, atd. Za akční členy lze považovat například regulační tyče, ventily, čerpadla, elektroohříváky a sprchové systémy, atd. Příklady umístění akčních členů a měřených parametrů vybraných regulačních obvodů JE s tlakovodním reaktorem je uveden na Obr. 1 [5].



Obr. 1: Základní měření a akční členy jaderného bloku s tlakovodním reaktorem [5]

Měřicí body:

- měření neutronového toku, výkonu reaktoru (1),
- teplota a průtok ve studené větvi I.O (2),
- teplota a průtok v horké větvi I.O (3),
- tlak v I.O, hladina v KO (4),
- průtok napájecí vody do PG, průtok páry z PG a hladina vody v PG (5),
- tlak páry v hlavním parním kolektoru (6),
- otáčky generátoru a napětí (7).

Akční členy (AČ):

- řízení výkonu reaktoru, polohou regulačních tyčí (AČ 1),
- regulace tlaku v I.O pomocí sprchy a elektrických ohříváků (AČ 2),
- regulace otáček turbíny, respektive výkonu elektrárny (AČ 3),
- regulace, snižování tlaku v případě nadlimitních hodnot (AČ 4),
- regulace hladiny v PG (AČ 5),
- regulace hladiny v kompenzátoru objemu (AČ 6),
- regulace napětí, respektive jalového výkonu (AČ 7).

1.1. Určení tepelného výkonu jaderného reaktoru

Určení tepelného výkonu reaktoru se provádí odvozením z měřeného neutronového toku, případně z průtoku a teplotního rozdílu chladiva na vstupu a výstupu z reaktoru (přímá metoda) nebo z tepla předaného sekundárnímu okruhu (nepřímá metoda).

Tepelný výkon reaktoru lze určit tzv. přímou metodou. Výkon reaktoru na úrovni vstupních a výstupních hrdel je součinem průtoku a rozdílu entalpií [2]

$$N_{tR} = \dot{m}_R \Delta h(p, T)_R, \quad (1.1)$$

kde

N_{tR} – tepelný výkon reaktoru [W],

\dot{m}_R – hmotnostní průtok reaktorem [kg/s],

$\Delta h(p, T)_R$ – entalpický spád na reaktoru, jež je funkcí tlaku a teploty I.O. [J/kg] .

Entalpie se určí z naměřených tlaků a teplot v jednotlivých smyčkách primárního okruhu. Při korekci na výkon aktivní zóny je nutné ještě uvažovat tepelné ztráty stěnou nádoby reaktoru. Složitějším problémem je měření průtoku chladiva jednotlivými smyčkami primárního okruhu. Provozní měření neexistuje a dodatečná instalace škrťacích orgánů do primárního potrubí jen pro garanční měření je z hlediska bezpečnosti nepřijatelná. Pro úplnost je třeba uvést, že existuje ještě možnost určení průtoku chladiva z charakteristiky čerpadla v závislosti na tlakovém spádu čerpadla. Přesnost charakteristiky, a tím i odečtené hodnoty ale neodpovídají požadované přesnosti nutné k určení výkonu reaktoru. Výše uvedené skutečnosti zatím vylučují možnost přímého určení tepelného výkonu reaktoru. Proto byla rozpracována pro stávající jaderné elektrárny nepřímá metoda – určení tepelného výkonu reaktoru pomocí tepelné bilance mezi I.O. a II.O [2]

$$N_{tR} = \sum_i^n N_{tPG_i} = \sum_i^n \dot{m}_{PG_i} \Delta h(p, T)_{PG_i}, \quad (1.2)$$

kde

N_{tR} – tepelný výkon reaktoru [W],

N_{tPG} – tepelný výkon i-tého parogenerátoru [W],

\dot{m}_{PG_i} – hmotnostní průtok reaktorem [kg/s],

$\Delta h(p, T)_{PG_i}$ – entalpický spád i – tého parogenerátoru, jež je funkcí tlaku a teploty II.O. [J/kg],

n – počet parogenerátorů [-].

Dále musí být do tepelné bilance započítány ztráty způsobené odluky a odkaly v parogenerátorech.

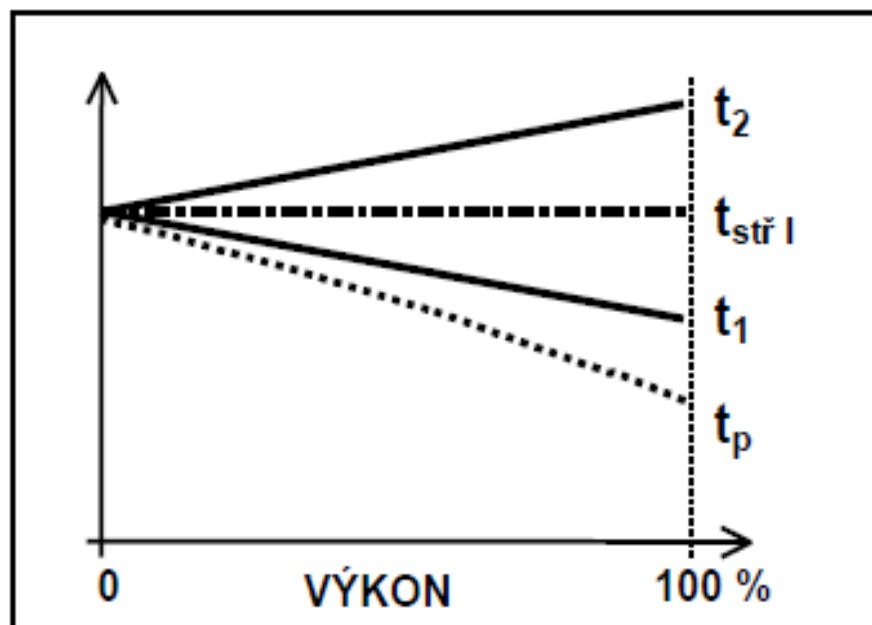
Ze stanoveného tepelného výkonu ze vztahu (1.1) lze zpětně vztahem (1.2) průtok média reaktorem případně rozložení průtoku jednotlivými smyčkami [2].

1.2. Regulační režimy jaderného bloku s tlakovodním reaktorem

Při uvažování konstantního průtoku primárním okruhem je možné ovlivňovat předávaný tepelný výkon reaktoru jen za pomoci střední teploty v I.O. nebo tlaku v hlavním parním kolektoru. Tyto hlavní parametry jsou regulovány a na jejich základě zavádíme dva rozdílné přístupy k řízení jaderného bloku s tlakovodním reaktorem.

a) Regulace na konstantní střední teplotu primárního chladiva ($t_{stř I}$):

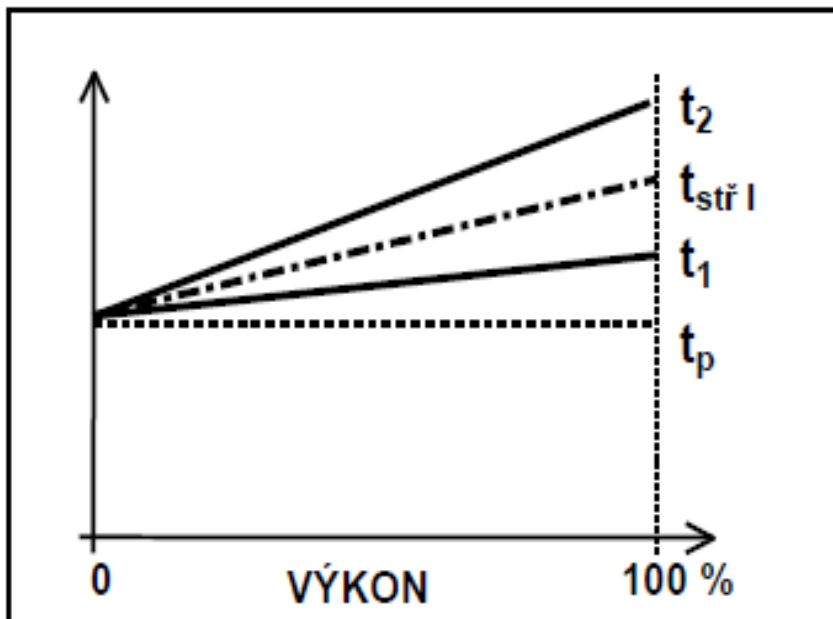
Střední teplota chladiva je udržována s proměnným výkonem konstantní. Změnou výkonu se mění pouze teplotní rozdíl mezi horkou a studenou větví primárního okruhu. Je výhodný pro reaktory s velkým záporným teplotním koeficientem reaktivity, kde vzhledem k samoregulačním vlastnostem takovýchto reaktorů klade při proměnlivém odebíraném výkonu menší nároky na počet a velikost regulačních zásahů akčních orgánů obvodů výkonové regulace reaktoru. Nevýhodami tohoto programu jsou poměrně velké změny teploty a tlaku páry v sekundárním okruhu (tlak s klesající zátěží vzrůstá) [6].



Obr. 2: Regulace na konstantní střední teplotu primárního chladiva [6]

b) Regulace na konstantní tlak v hlavním parním kolektoru (p_{HPK}):

Tlak a teplota páry na výstupu z parogenerátoru jsou udržovány na konstantní hodnotě při všech výkonových hladinách bloku. Střední teplota chladiva v primárním okruhu tedy musí s rostoucím výkonem také růst. Tím jsou vyvolávány nejen velké změny objemu chladiva, ale i reaktivity paliva. Tyto změny musí být kompenzovány regulačními zásahy v kompenzátoru objemu i většími posuvy regulačních nebo kompenzačních tyčí reaktoru. Provoz sekundárního okruhu (parogenerátoru i turbíny) je optimální, ale pro primární okruh jsou provozní podmínky méně příznivé. Teplotní změny chladiva vyvolávají větší regulační zásahy v reaktoru a snižují i životnost reaktorové nádoby [6].



Obr. 3: Regulace na konstantní tlak v hlavním parním kolektoru [6]

2. Měření provozních parametrů na I.O. tlakovodních jaderných elektráren

Efektivita a bezpečnost jaderných elektráren závisí z velké části na přesnosti a rychlosti měření charakteristických provozních parametrů. Základní parametry charakterizující dostatečně stav jaderného reaktoru jsou následující [2]:

- neutronový výkon reaktoru,
- tepelný výkon reaktoru,
- rozložení výkonu reaktoru,
- teplota chladiva na výstupu z AZ,
- rozložení teplot na smyčkách I.O.
- průtok chladiva AZ,
- tlak v kompenzátoru objemu,
- tlakový spád na reaktoru,
- hladina v kompenzátoru objemu,
- pozice regulačních orgánů v AZ,
- koncentrace H_3BO_3 v chladivu.

Pro ovládání technologického procesu a zajištění správného a bezpečného chodu je jaderná elektrárna vybavena systémy, do kterých se soustředí informace z jednotlivých čidel měření. Odtud se posílají signály do řídicích a ochranných systémů. Tyto systémy se označují jako systémy kontroly a řízení (SKŘ) [4].

Volba správného měřicího systému zajišťuje včasnou detekci a korigování odchylek od normálních stavů (ochrana do hloubky). Použitá instrumentace, způsob zpracování a interpretace měřených hodnot musí být takové, že v případě ohrožení stanovených limitních hodnot mohou být včas provedena nápravná opatření. Měřicí, řídicí a ochranné systémy musí být projektovány tak, aby byla zajištěna vysoká funkční spolehlivost, úměrná jejich významu z hlediska jaderné bezpečnosti. Tomu musí odpovídat způsob, periodičita a kvalita ověřování stavu systémů [4].

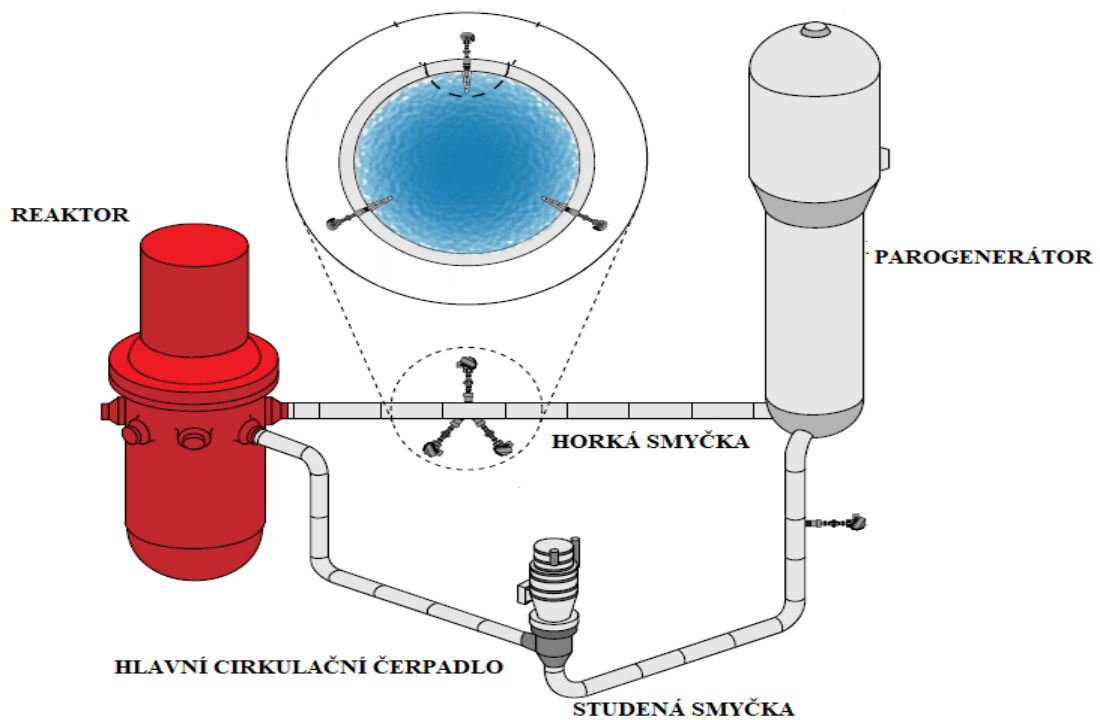
2.1. Měření teplot na primárním okruhu tlakovodních jaderných elektráren

Měření teploty na I.O. JE s tlakovodními reaktory se provádí pomocí termočlánků a odporových teploměrů. Každý z těchto přístrojů má pozitivní i negativní aspekty. Odporový teploměr nabízí vyšší přesnost, stabilitu a měří absolutní hodnoty teplot. Nevýhodou jsou jeho pořizovací náklady a potřeba stabilizovaného napájecího zdroje. Jak odporové teploměry, tak termočlánky pracují s časovým zpožděním. Časové zpoždění nesmí překročit hodnotu, již charakterizuje provozní předpis [7].

Termočlánky pomáhají monitorovat rozložení výkonu AZ pomocí měření teploty chladiva na výstupu z vybraných palivových souborů. Termočlánky slouží k identifikaci teploty tzv. horkého kanálu, tedy tepelně nejzatíženějšího místa v AZ. Toto místo je nutné

monitorovat, aby nedošlo k překročení krizových podmínek přestupu tepla, které jsou pro reaktor zcela nepřijatelné.

Odporové detektory (RTD) měří teploty primárního chladiva jak na studených, tak horkých smyčkách I.O. Tyto údaje z odporových detektorů vstupují do řídicích a ochranných charakteristik, a tudíž jsou na ně kladeny větší nároky na přesnost a rychlou odezvu. Měření teploty na smyčkách I.O. je třeba provádět v místech, kde je rozložení proudu chladiva nejvíce rovnoměrné, aby nedocházelo ke zkreslování hodnot [2], [7].



Obr. 4: Rozmístění RTD na I.O. horké smyčky PWR [1]

Měřením teplotního rozdílu mezi horkou a studenou smyčkou se využívá k přesnému výpočtu tepelného výkonu provozovaného reaktoru.

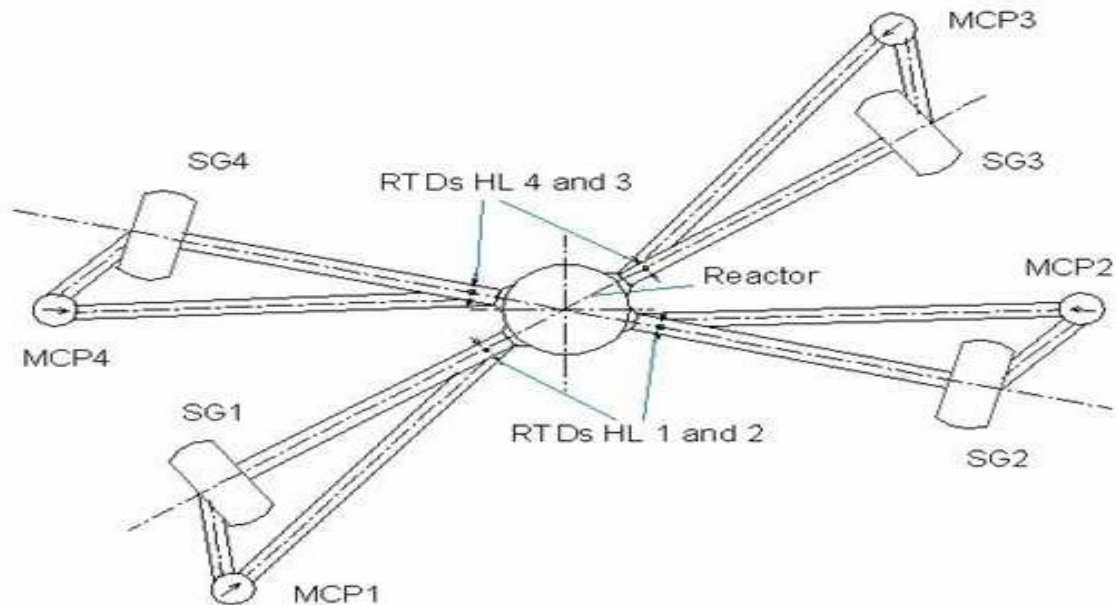
1.2. Měření teplot na primárním okruhu VVER 1000

VVER je vodou moderovaný a chlazený tlakovodní reaktor ruského typu. V jaderné elektrárně Temelín se jedná o typ VVER-1000/V320. Primární okruh tohoto typu reaktoru, jehož schéma je na Obr. 5, je tvořen 4 smyčkami. Každá smyčka se dělí [2]:

- horká větev (HL) - od horkého nátrubku reaktoru po nátrubek horkého kolektoru parogenerátoru (SG),
- studená větev I. - od nátrubku studeného kolektoru parogenerátoru po sací nátrubek hlavního cirkulačního čerpadla (MCP),
- studená větev II. - od výtlačného nátrubku hlavního cirkulačního čerpadla po studený nátrubek reaktoru.

Na každé cirkulační smyčce jsou prováděna následující měření [2]:

- průtok smyčkou - 3 měření,
- tlaková ztráta na hlavním cirkulačním čerpadle - 1 měření,
- tlaková ztráta na parogenerátoru - 1 měření,
- přetlak na těsnění hlavního cirkulačního čerpadla - 1 měření,
- teplota v horkých větvích - 6 měření,
- teplota ve studených větvích - 6 měření.

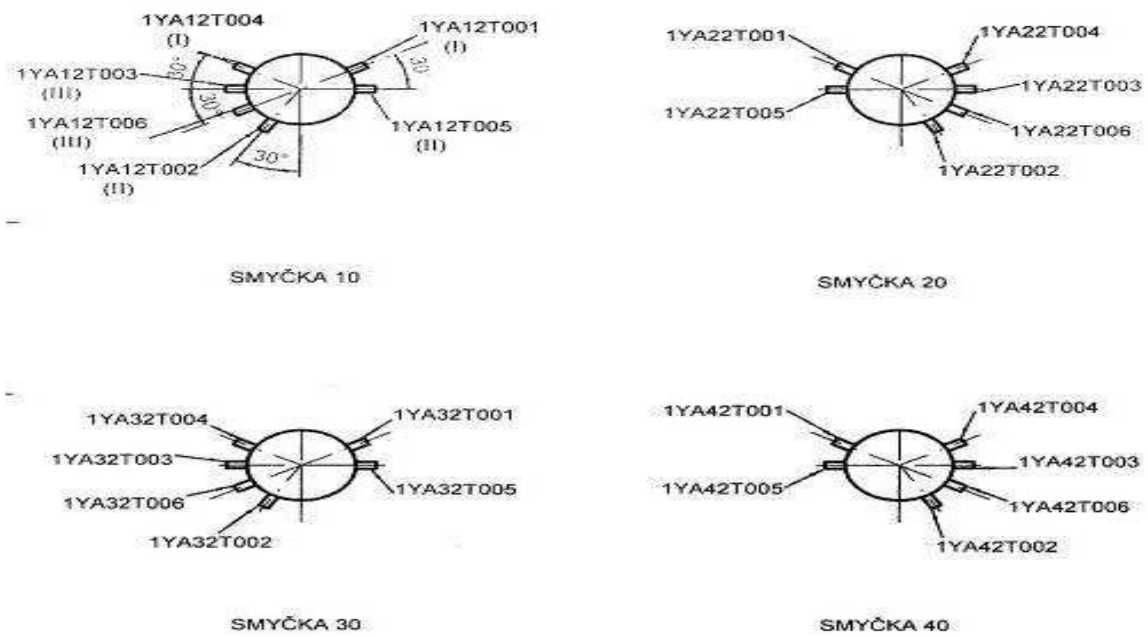


Obr. 5: Primární okruh VVER 1000 [2]

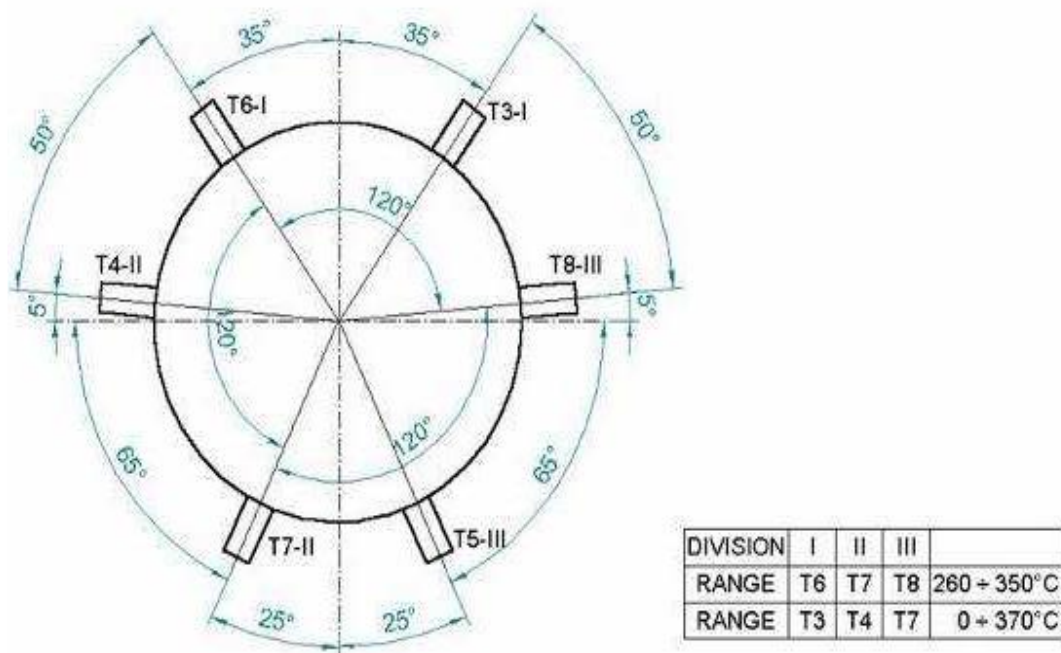
Teplota chladiva v reaktoru se měří na třech místech. Je měřena teplota na výstupu z palivových souborů pomocí termočlánků. Dále je měřena teplota na všech vstupních (studených) větvích cirkulačních smyček a také na výstupních (horkých) větvích jednotlivých smyček. Na každé větvi je šest měřících míst teploty chladicího média. Pro měření jsou použity odporové teploměry umístěné v teploměrných jímkách. Schéma rozmístění měření teplot na studených resp. horkých smyčkách je uvedeno na Obr. 6, resp. Obr. 7. Těchto šest teploměrů je zapojeno do tří divizí [2]:

- divize 1 obsahuje měření teploty 1YA11T003 a 1YA11T006,
- divize 2 obsahuje měření teploty 1YA11T004 a 1YA11T007,
- divize 3 obsahuje měření teploty 1YA11T005 a 1YA11T008.

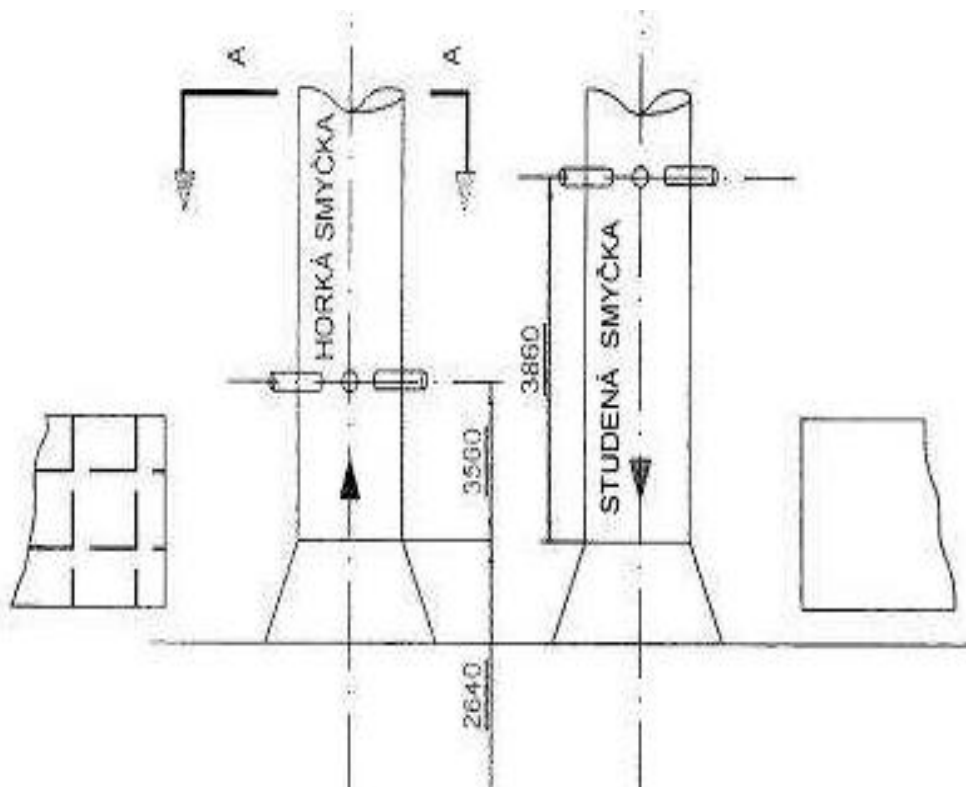
Teploměry pořadových čísel T003 ÷ T005 jsou určeny pro rozsah 0 ÷ 370 °C a teploměry pořadových čísel T006 ÷ T008 jsou určeny pro rozsahy 260 ÷ 350 °C.



Obr. 6: Schéma rozložení RTD na studených větvích VVER 1000 [2]



Obr. 7: Schéma rozložení RTD na horkých větvích VVER 1000 [2]



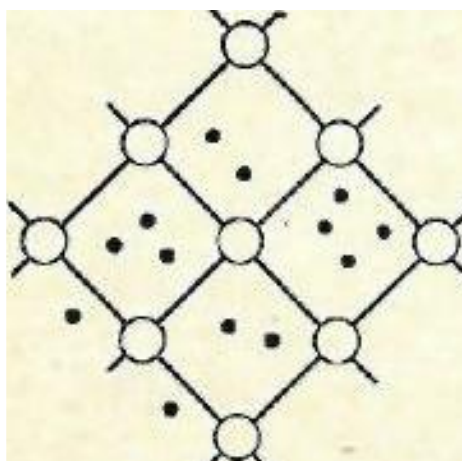
Obr. 8: Vzdálenost RTD od tlakové nádoby reaktoru (VVER 1000) [2], [5]

3. Měření teploty pomocí RTD

Principem odporových kovových snímačů teploty (RTD) je závislost odporu kovu na teplotě. Senzor teploty lze nazvat funkčním prvkem, který tvoří počátek měřicího řetězce. Nejčastěji se v jaderné energetice používají platinové snímače. Pro kvalitní vyhodnocení signálu je potřebné navrhnout optimálně celý měřicí řetězec, aby nedocházelo ke zkreslování výstupních veličin.

3.1. Odporový kovový snímač teploty

Snímač teploty je vstupní prvek měřicího řetězce a převádí teplotu na jinou fyzikální veličinu, a to elektrický odpor. Elektrický odpor kovového vodiče roste, pokud se zvyšuje jeho teplota. Valenční elektrony atomů kovu jsou k jádrům vázány velmi slabě. Připojíme-li oba konce kovu ke zdroji napětí, generuje se v něm elektrické pole, jenž zapříčiní usměrněný pohyb volných elektronů, tedy elektrický proud. Ionty krystalové mřížky kovu kmitají kolem svých rovnovážných poloh tím rychleji, čím je teplota vyšší. S rostoucí teplotou roste pravděpodobnost srážek volných elektronů s ionty mřížky. Tím se brzdí uspořádaný pohyb volných elektronů, což se projevuje jako elektrický odpor vodiče [8].



Obr. 9: Schéma krystalové mřížky s volnými elektrony [8]

Míru změny odporu vodiče v závislosti na teplotě udává teplotní součinitel odporu β , který je poměrnou změnou odporu vodiče dělenou elementární změnou teploty, tedy [8]

$$\beta = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} . \quad (3.1)$$

Závislost v rozsahu teplot 0 °C až 100 °C lze vyjádřit přibližným vztahem [1], [8]

$$R_T = R_0 (1 + \beta \Delta T) . \quad (3.2)$$

Pro větší teplotní interval v oblasti 0 - 850°C a také pro dosažení vyšší přesnosti cca $\pm 0,3$ °C je třeba přihlížet k proměnlivosti teplotního součinitele odporu v závislosti na změně teploty a je nutné nahradit rovnicí (3.2) vztahem [1], [8]

$$R_T = R_0 (1 + \beta T + \gamma T^2), \quad (3.3)$$

kde

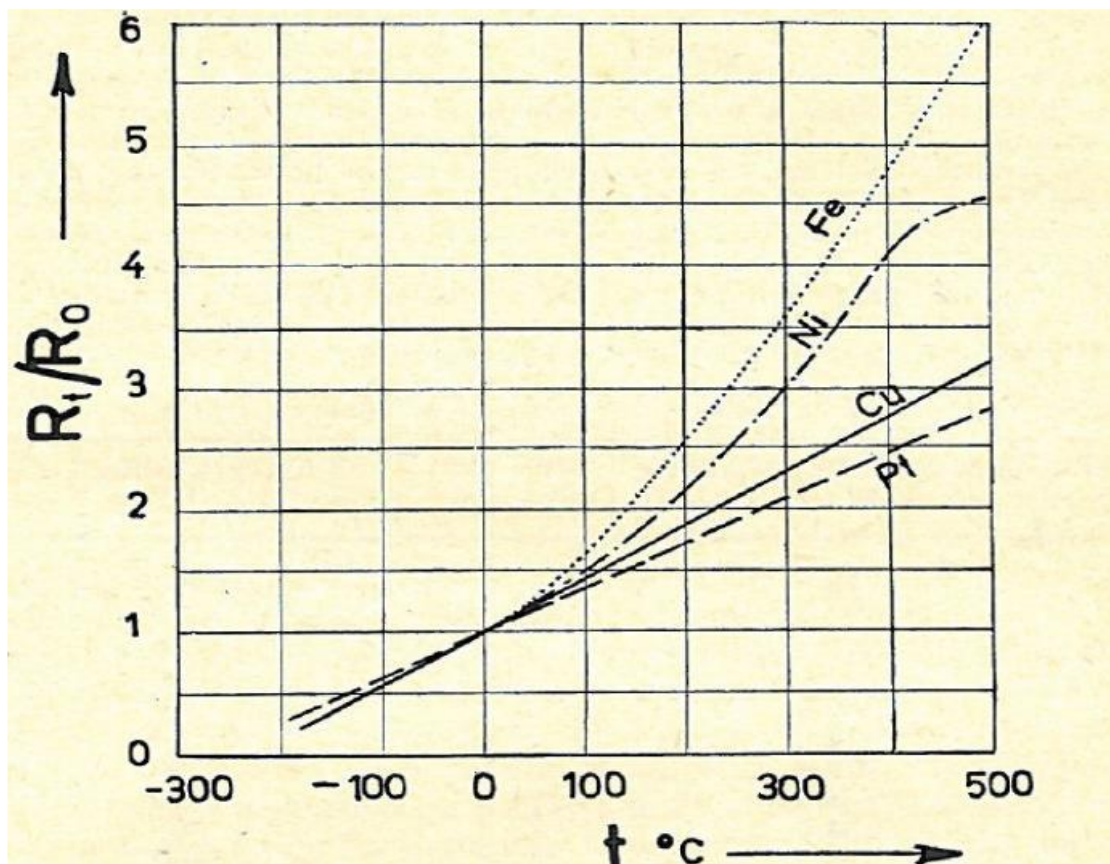
R_T - odpor snímače při teplotě t [Ω],

R_0 - odpor snímače při teplotě 0°C [Ω],

T - teplota snímače [°C],

β, γ - teplotní součinitelé odporu závisující na použitém materiálu [K^{-1}].

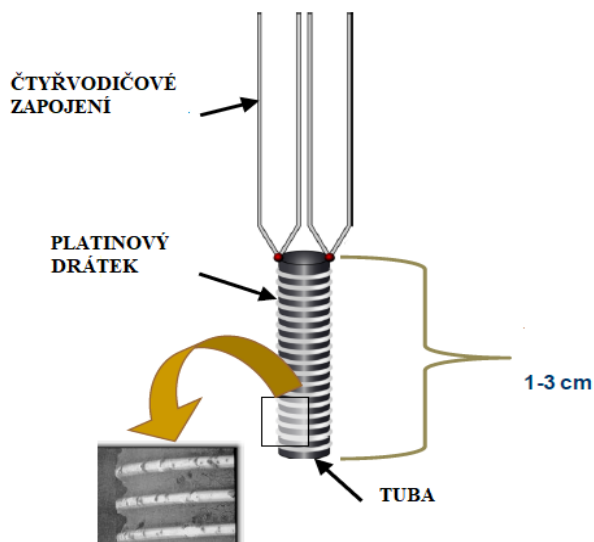
Tento vztah vstupuje do výpočtů odporových teploměrů na jaderných elektrárnách. Teplotní součinitele β, γ většinou uvádí výrobce. Lze je také zjistit změřením odporů R_1 a R_2 při dvou pevných teplotách T_1 a T_2 .



Obr. 10: Závislost odporu na teplotě některých kovů [9]

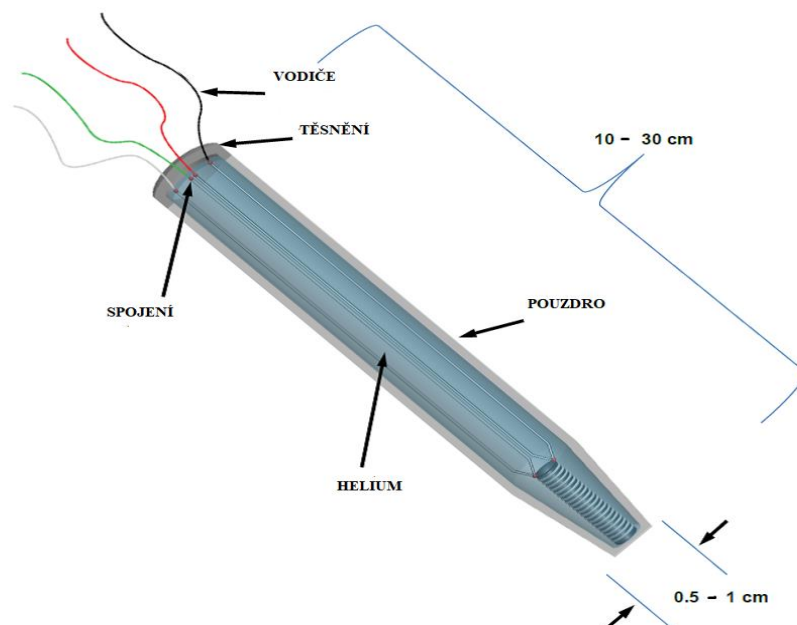
Vztah (3.3) splňují jen některé čisté kovy s obsahem nečistot do 0,1 %, nejlépe platina. Výhodou platiny je dlouhodobě stálá lineární závislost odporu platiny na teplotě, vysoká teplota tavení a také dobré mechanické vlastnosti, především tažnost a ohebnost, které dovolují vyrábět snímače s velmi dobrým vyloučením mechanického napětí v podobě tenkých drátků. Platina je také odolná vůči oxidaci, čímž je zajištěna stálost průřezu drátku a tím odporu. Drátek je smotan

do spirály, aby se předešlo mechanickému pnutí vlivem tepelné roztažnosti. Ukotven je v tubě ze skla, která je zapuštěna do válcovitého pouzdra z nerezové oceli nebo platiny [1].



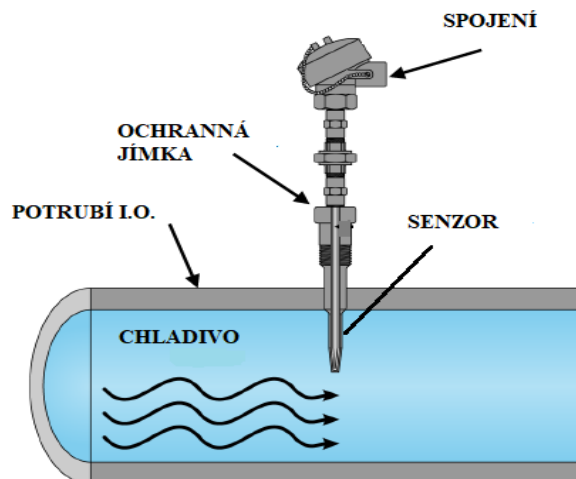
Obr. 11: Odporové čidlo teploty [1]

Pouzdro je naplněno většinou heliem, které zprostředkuje přenos tepla mezi prostředím a platinovým vláknem. Skleněným zátavem, jenž pouzdro uzavírá, procházejí vodiče. Pro zabezpečení co největší přesnosti se používá čtyřvodičové zapojení.



Obr. 12: RTD [1]

Vzhledem k rychlosti proudící kapaliny je nutné umisťovat teploměry do teploměrných jímek, viz Obr. 13. Jedná se o kovové trubice, které teploměr chrání před mechanickým a chemickým poškozením.



Obr. 13: RTD v ochranné jímkce umístěné v I.O [1]

Tab. 1. shrnuje základní vlastnosti RTD, jež se nejvíce používají v jaderných elektrárnách. Hodnoty v závorce platí pro RTD s ochrannou jímkou. V jaderných elektrárnách se na smyčkách obvykle používají snímače Pt 100. Písmena ve značení znamenají, že použitý materiál je platina a číslo je hodnota odporu při teplotě 0°C. Na jaderných elektrárnách typu VVER se můžeme ještě setkat s odporovými snímači Pt 46.

Tab. 1: Typické charakteristiky RTD používaných na jaderných elektrárnách [7]

Délka	30 – 60 cm
Průměr	0,6 – 1 cm (1 -2 cm)
Hloubka ponoření v chladivu	4 – 10 cm
Hmotnost	0,1 – 0,25 kg (0,3 -3 kg)
Materiál pouzdra	nerezová ocel
Materiál senzoru	platina
Odpor při teplotě tání	40, 100, 200 Ω
Teplotní interval	0 – 600 °C
Přesnost	± 0,7 °C
Zapojení	čtyřvodičové
Časová konstanta	0,4 – 3 s (3 – 6 s)

3.2. Měřicí řetězec

Měřená veličina je napětí, které je následně přepočítáno na odpor pomocí Ohmova zákona

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3.4)$$

kde

U – elektrické napětí [V],

I – elektrický proud [A],

R – elektrický odpor [Ω].

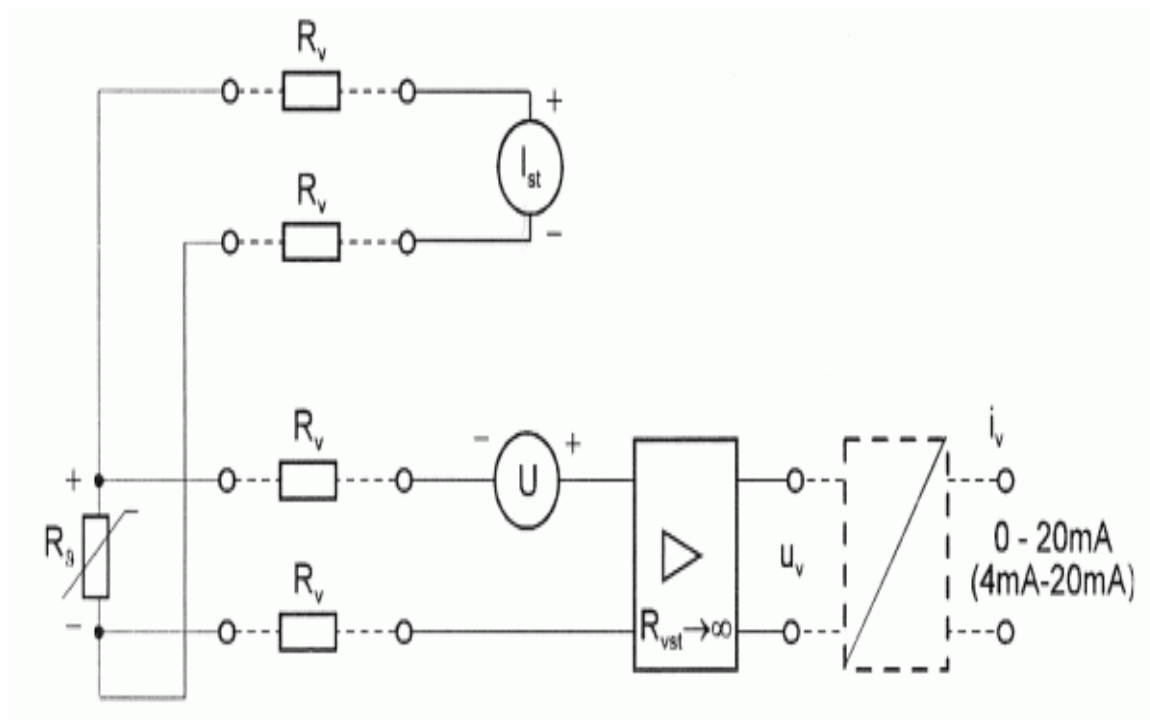
Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky [9]:

- minimalizace vlivu měřicího proudu, tj. proudu procházejícího senzorem,
- minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru,
- analogová nebo číslicová linearizace,
- malá časová konstanta.

K odečtení teploty musí být odporovým teplotním čidlem veden proud. Tento proud ovšem může vést k **vlastnímu zahřívání čidla**. Hodnoty proudu procházejícího odporovým teplotním čidlem Pt100 ($R_0 = 100 \Omega$) se musí udržovat, např. pod 2 mA, aby se zabránilo problémům v důsledku vlastního zahřívání [9].

Vzhledem k tomu, že platinový senzor je v principu rezistor, je možno jeho odpor změřit ohmmetrem. Kvůli malému odporu senzoru a jeho malé citlivosti (cca 0,385 Ω/K) je přesné měření na základě odporu vedení obtížné. Odpor o velikosti 1 Ω každého přívodního vodiče Pt100 k měřicímu přístroji způsobí již chybu větší než 5 K. Aby se zabránilo chybě **vlivem odporu vodičů**, je většina měření Pt100 prováděna přes čtyřvodičové zapojení. Dva vodiče jsou využity pro přívod budícího proudu a přes druhé dva se na odporové teplotní čidlo připojuje voltmetr, jenž slouží k měření. Je-li impedance voltmetru vysoká, je možno chybu několika ohmů, způsobenou malým odporem vedení, zanedbat. Princip čtyřvodičového zapojení je zobrazen na Obr. 14. Toto zapojení umožňuje měřit změny odporu vzdáleného i na velké vzdálenosti [9].

Výstup ze zesilovače je přiveden na převodník, který převádí veličinu na unifikovaný signál (0-10 V, 4-20 mA pro dálkový přenos). Posledním prvkem měřicího řetězce je vyhodnocovací zařízení, které zpracovává výstupní signál z převodníku do potřebné formy (např. čísla apod.).



Obr. 14: Čtyřvodičové zapojení odporového snímače [8]

4. Časová konstanta RTD

Z teorie nestacionárního sdílení tepla vyplývá, že teplota snímače se vyrovná s měřeným prostředím s určitým časovým zpožděním. Do té doby bude snímač ukazovat chybnou hodnotu. Důležitou veličinou udávající rychlost přechodového děje je časová konstanta τ_c . Čím kratší je časová konstanta snímače, tím rychleji je snímač schopen reagovat na změnu teploty. Zpoždění závisí na vlastnostech měřeného prostředí, na materiálu, charakteristických rozměrech snímače, ochranné jímky atd. Proto je možné časovou konstantu vztahovat jen na konkrétní druh snímače a jeho specifické umístění do měřeného prostředí.

Odvození časové konstanty teploměru vychází z obecné Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla [10]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 T + q_v, \quad (4.1)$$

kde

T – teplota [$^{\circ}\text{C}$],

τ – čas [s],

λ – součinitel tepelné vodivosti [W/m K],

ρ – hustota tělesa [kg/m^3],

c – měrná tepelná kapacita tělesa [J/kg K]

q_v – vnitřní zdroj tepla [W/m^3].

Rovnici lze řešit za pomoci okrajové podmínky 3. druhu, kde na hranici tělesa platí [10]

$$\alpha(T_{\infty} - T_p) = -\lambda \nabla T, \quad (4.2)$$

kde

λ – součinitel tepelné vodivosti [W/m K],

α – součinitel přestupu tepla [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$],

T_{∞} – teplota tekutiny [$^{\circ}\text{C}$],

T_p – teplota povrchu čidla [$^{\circ}\text{C}$].

Počáteční podmínka je definována takto

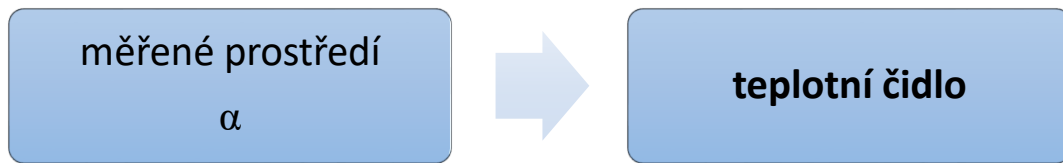
$$T = T_{\text{počáteční}} \quad \text{pro } \tau = 0.$$

Fourierovu diferenciální rovnici lze spolu s podmínkami řešit exaktně pomocí separace proměnných.

4.1. RTD popsany diferenciální rovnicí 1. řádu

Aproximujeme-li čidlo jako platinový velmi tenký svislý drátek (tj. v každém časovém okamžiku se teplota příliš neliší mezi polohou uvnitř a na okraji drátku), lze využít pro odvození

časové konstanty tzv. kapacitní metodu. Kapacitní metoda vychází z energetické bilance tepelných toků. Tepelný tok je přenášen z (do) drátku do (z) okolního prostředí konvekcí.



Obr. 15: Přenos tepla: jednoduchý systém

Pak lze bilanční rovnici psát

$$\alpha(T_{\infty} - T_p)S = \rho cV \frac{dT}{d\tau}, \quad (4.3)$$

kde

α – součinitel přestupu tepla [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$],
 c – měrná tepelná kapacita čidla [$\text{J}/\text{kg K}$],
 ρ – hustota čidla [kg/m^3],
 V – objem čidla [m^3],
 S – povrch čidla [m^2],
 T_p – teplota povrchu čidla [$^{\circ}\text{C}$].

Po separaci proměnných a integraci vznikne vztah

$$\frac{T_p - T_{\infty}}{T_{poč} - T_{\infty}} = e^{(-\frac{\alpha S}{\rho cV} \tau)}. \quad (4.4)$$

Upravením rovnice

$$\theta = e^{(-\frac{\tau}{\tau_c})}, \quad (4.5)$$

kde

τ_c – časová konstanta [s],
 θ – bezrozměrná teplota [-].

Tedy časová konstanta je určena vztahem

$$\tau_c = \frac{\rho cV}{\alpha S} \quad (4.6)$$

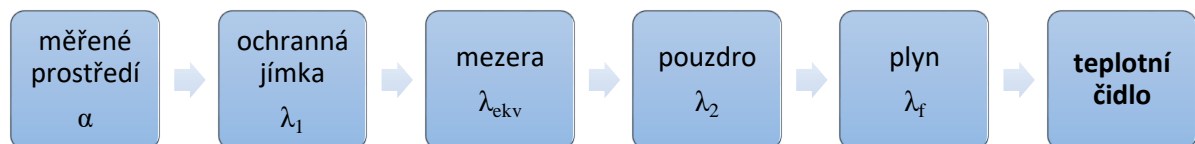
a bezrozměrná teplota

$$\theta = \frac{T_p - T_\infty}{T_{počáteční} - T_\infty} \quad (4.7)$$

Zavedení bezrozměrné teploty má výhodu v tom, že interval jejich změn je v rozsahu $\langle 0,1 \rangle$. Teplota platinového drátku se mění exponenciálně s časem, a to tím pomaleji, čím je časová konstanta větší.

4.2. RTD popsaný diferenciální rovnicí vyšších řádů

Teplotní čidlo v jaderné elektrárně je uloženo v pouzdru a také v ochranné jímce. Při náhlém zvýšení teploty chladiva primárního okruhu je přenos tepla z chladiva do snímače složitější. Teplo přestupuje nejdříve skrz ochrannou jímku, mezerou mezi jímkou a pouzdrum, pouzdrum, plynem obklopující teplotní čidlo a až poté teplotním snímačem. Snímač proto reaguje s daleko větším časovým zpožděním [4].



Obr. 16: Přenos tepla – složený systém

Časová konstanta v tomto případě se vypočte tak, že součinitel přestupu tepla ve vztahu (4.6) nahradíme koeficientem prostupu tepla [1]

$$\tau_\xi = \frac{\rho c V}{k S}, \quad (4.8)$$

kde

- k – koeficient prostupu tepla [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$],
- c – měrná tepelná kapacita čidla [$\text{J}/\text{kg K}$],
- ρ – hustota čidla [kg/m^3],
- V – objem čidla [m^3],
- S – povrch čidla [m^2].

Pro koeficient prostupu tepla platí vztah:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{\alpha r_i} + \sum_j \frac{1}{\lambda_j} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j}}, \quad (4.9)$$

kde

- α – součinitel přestupu tepla [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$],

r_i – poloměr (drátek – médium) [m],
 r_{j+1} – vnější poloměr [m],
 r_j – vnitřní poloměr [m],
 λ_j – součinitel tepelné vodivosti [W/m K].

Určení časové konstanty RTD dle vztahu (4.8) není zcela přesné. Při definici uvedeného vztahu byla zavedena řada zjednodušujících předpokladů:

- reálné teplotní čidlo je nahrazeno svislým velmi tenkým platinovým drátkem,
- λ a c nejsou funkcí teploty,
- jednorozměrný přenos tepla,
- atd.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla, který není triviální, lze využít teorie podobnosti. Pro výpočet součinitele přestupu tepla se používá Nusseltovo podobnostní číslo [10]

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda_f}, \quad (4.10)$$

kde

α – součinitel přestupu tepla tekutiny [W/m² K],
 L – charakteristický rozměr (průměr platinového drátku) [m],
 λ_f – součinitel tepelné vodivosti tekutiny [W/m K].

Výpočet Nusseltova podobnostního čísla je závislý na velikosti Reynoldsova podobnostního čísla. V případě svislého drátku obtékaného tekutinou v kolmém směru platí tyto charakteristické rovnice [10]

- pro $Re \leq 10^3$

$$\overline{Nu_{f,d}} = 0,5 Re_{f,d}^{0,5} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr_f}{Pr_d}\right)^{0,25}, \quad (4.11)$$

- pro $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu_{f,d}} = 0,25 Re_{f,d}^{0,6} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr_f}{Pr_d}\right)^{0,25}, \quad (4.12)$$

- pro $2 \cdot 10^5 \leq Re < 2 \cdot 10^6$

$$\overline{Nu_{f,d}} = 0,23 Re_{f,d}^{0,8} Pr^{0,37} \left(\frac{Pr_f}{Pr_d}\right)^{0,25}, \quad (4.13)$$

kde

Nu – Nusseltovo podobnostní číslo [-],

Re – Reynoldsovo podobnostní číslo [-],

Pr – Prandtlovo podobnostní číslo [-],

$\left(\frac{Pr_f}{Pr_d}\right)$ – opravný koeficient [-].

Index f se vztahuje k médiu, index p k povrchu tělesa a index d značí charakteristický rozměr.

Vztah Reynoldsova podobnostního čísla je následující: [10]

$$Re = \frac{wL}{\nu}, \quad (4.14)$$

kde

w – rychlost tekutiny [W/m² K],

L – charakteristický rozměr (průměr platinového drátku) [m],

ν – kinematická viskozita tekutiny [m²/s].

Vztah Prandtlova podobnostního čísla (1)

$$Pr = \frac{\eta L}{\lambda_f}, \quad (4.15)$$

kde

η – dynamická viskozita [Pa s],

L – charakteristický rozměr (průměr platinového drátku) [m],

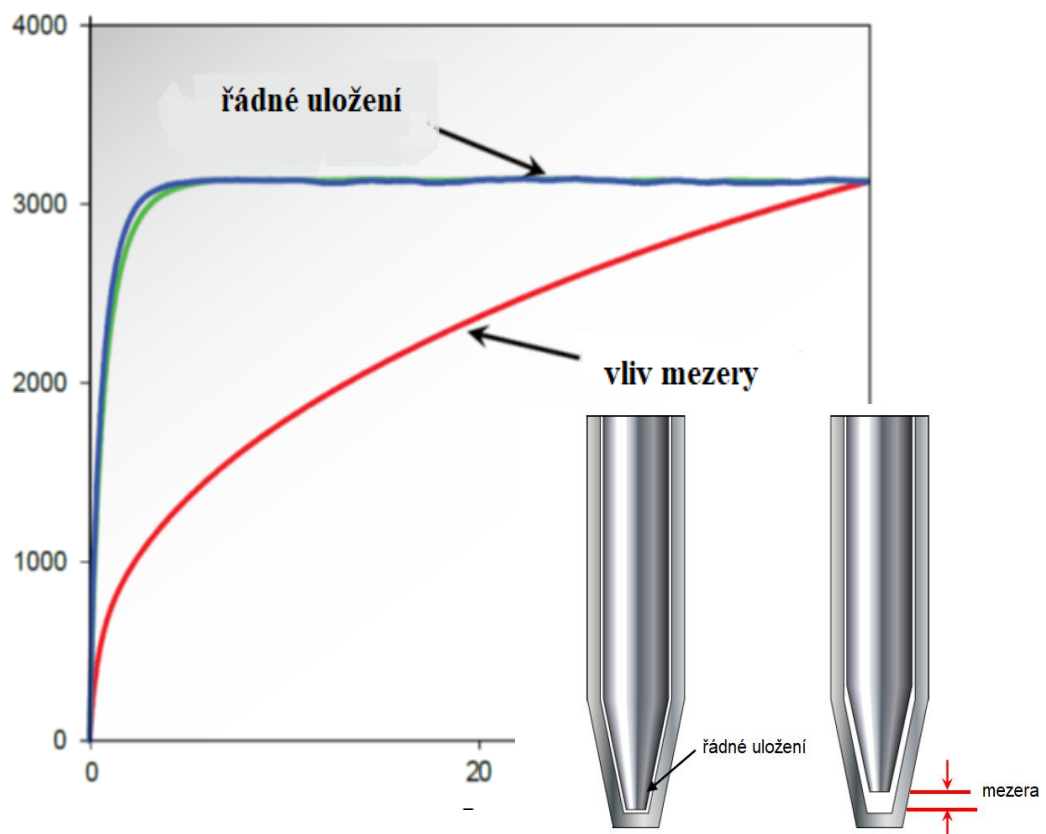
λ_f – součinitel tepelné vodivosti tekutiny [W/m K].

5. Ovlivnění časové konstanty

Způsoby jak lze ovlivnit časovou konstantu snímače ukazuje vztah (4.8). V praxi je třeba dbát především na řádné uložení snímače do ochranné jímky. Velký vliv na velikost časové konstanty má součinitel přestupu tepla měřeného média. Dále nelze opomenout nepřímý vliv teploty, která ovlivňuje veličiny jako je tepelná roztažnost, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti, hustota atd. Důležitým jevem je tzv. stárnutí RTD, které vlivem provozních podmínek mění vlastnosti RTD. Z tohoto důvodu i velikost časové konstanty se mění během provozu JE.

5.1. Řádné uložení RTD do ochranné jímky

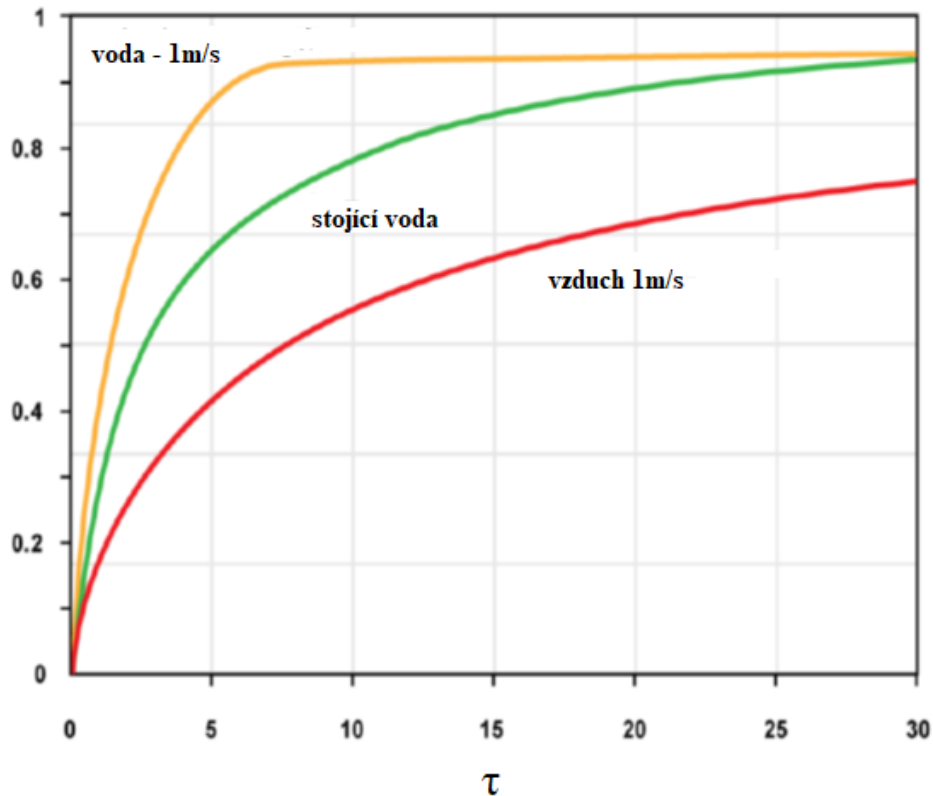
Největší vliv na časové zpoždění RTD má řádné uložení snímače do ochranné jímky. Mezi stěnou pouzdra snímače a ochranné jímky nesmí být mezera. Mezera má za následek zvýšení tepelného odporu a výrazné prodloužení hodnoty časové konstanty. Obr. 17 demonstruje vliv mezery na přechodovou charakteristiku RTD. Dokonce ani dva identické RTD pracující za stejných podmínek nemusí mít v důsledku výrobních tolerancí rozměrů stejnou časovou konstantu [1], [7].



Obr. 17: Vliv uložení RTD do ochranné jímky na časovou odezvu snímače [7]

5.2. Vliv součinitele přestupu tepla média

Dalším důležitým faktorem je součinitel přestupu tepla měřeného média. Obr. 18 ukazuje, že schopnost snímače detekovat rychleji skutečnou hodnotu je tím vyšší, čím vyšší je hodnota součinitele přestupu tepla [1], [7].



Obr. 18: Závislost součinitele přestupu tepla na časové odezvě snímače [1]

Úpravou vztahů (4.8) a (4.9) lze vyjádřit časovou konstantu v závislosti na součiniteli přestupu tepla [1]

$$\tau_{\xi} = C_1 + \frac{C_2}{\alpha}, \quad (5.1)$$

kde

τ_{ξ} – časová konstanta [s],

α – součinitel přestupu tepla tekutiny [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$],

C_1, C_2 – konstanty.

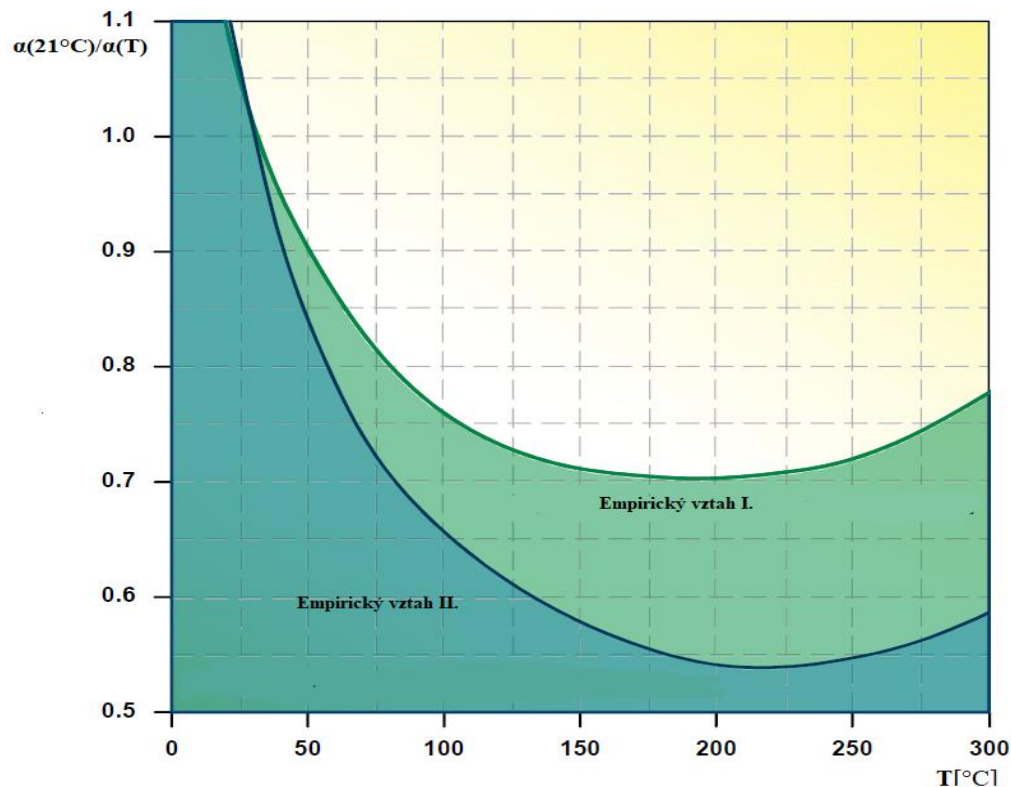
Konstanty C_1, C_2 lze vypočítat stanovením časové konstanty pro dvě různé hodnoty součinitele přestupu tepla měřeného prostředí. Pomocí výše uvedeného vztahu lze extrapolovat hodnotu časové konstanty získanou při laboratorních podmínkách k podmínkám panujícím za provozu.

5.3. Vliv teploty

Teplota ovlivňuje nepřímo hodnotu časové konstanty tím, že mění hodnoty veličin jako:

- tepelná roztažnost (mění se geometrické charakteristiky),
- měrná tepelná kapacita,
- součinitel tepelné vodivosti,
- hustota tekutiny,
- atd.

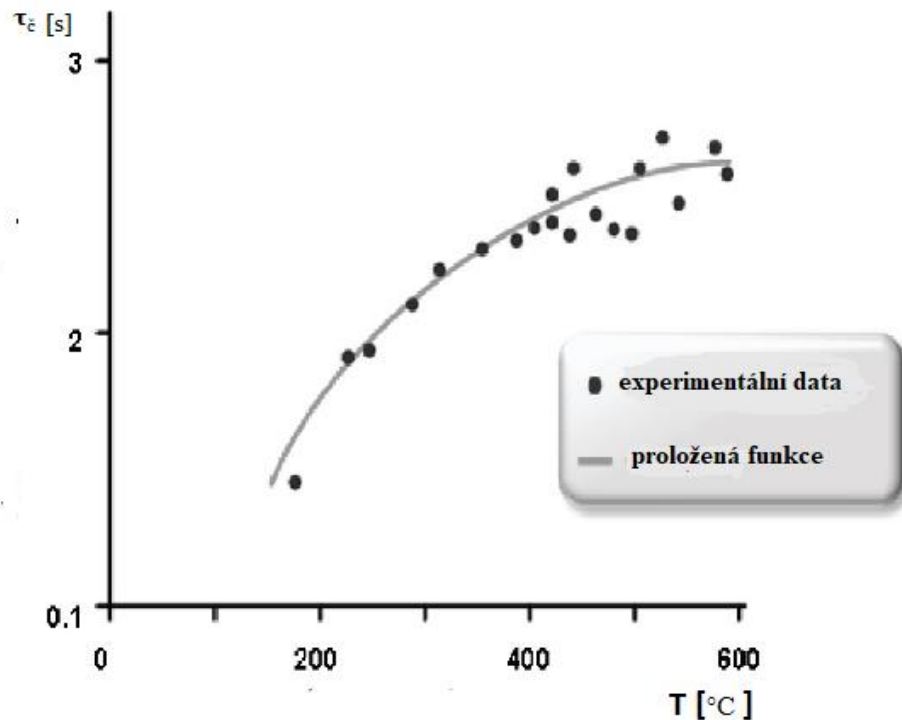
Obr. 19 ilustruje závislost součinitele přestupu tepla na teplotě.



Obr. 19: Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě [1]

Vliv teploty nelze jednoduše popsat, jelikož teplota figuruje v mnoha veličinách jako závisle proměnná. Na Obr. 20 je experimentálně získaná závislost teploty na časové odezvě RTD.

Stojí za zmínku, že vliv tlaku na časovou konstantu RTD je prakticky nulový [1].



Obr. 20: Závislost velikosti teploty na časové konstantě RTD [7]

5.4. Stárnutí RTD

Vlivem provozních podmínek - teplota, tlak, radiace, vlhkost, atd. dochází postupem času ke změnám materiálových vlastností RTD. Tento jev se nazývá stárnutí RTD. Dynamické vlastnosti RTD se tedy během provozu mění. Z tohoto důvodu je namísto ověřovat v určitých intervalech hodnotu časové konstanty experimentálním měřením. Na Obr. 21 je vidět vliv stárnutí několika vybraných RTD použitých na primárním okruhu jaderných elektráren. Třetí sloupec ukazuje hodnoty časových konstant vybraných RTD vypočtených před použitím k měření v I.O. jaderné elektrárny. Čtvrtý sloupec ukazuje hodnoty časových konstant změřených po roce a půl provozu. Je zde vidět patrný nárůst časové konstanty. RTD tedy vlivem provozu degraduje [1].

Nepřípustné jsou taktéž mechanické šoky či vibrace prodlužující velikost časové konstanty.

Item	Type	Response Time (sec)		Change
		Initial	18 Mos. Later	
1.	Wet	2.7	3.7	37%
2.	Wet	4.0	5.9	48%
3.	Wet	2.4	3.3	38%
4.	Wet	1.9	2.5	32%
5.	Wet	2.8	3.9	39%
6.	Wet	2.0	2.5	25%

Obr. 21: Degradace dynamických vlastností RTD vlivem provozu na I.O. JE [1]

5.5. Vliv měřicího řetězce

Časové zpoždění měření teploty není dáno pouze tepelnou setrvačností. Měřicí řetězec, jehož vstupním prvkem je RTD a výstupním prvkem je vyhodnocovací zařízení, je složen z elektronických obvodů. Elektronické obvody mají také svou časovou konstantu definovanou následně [8]

$$\tau_{\check{e}el} = R C, \quad (5.2)$$

kde

$\tau_{\check{e}el}$ – časová konstanta měřicího řetězce [s],

R – elektrický odpor [Ω],

C – kapacita [F].

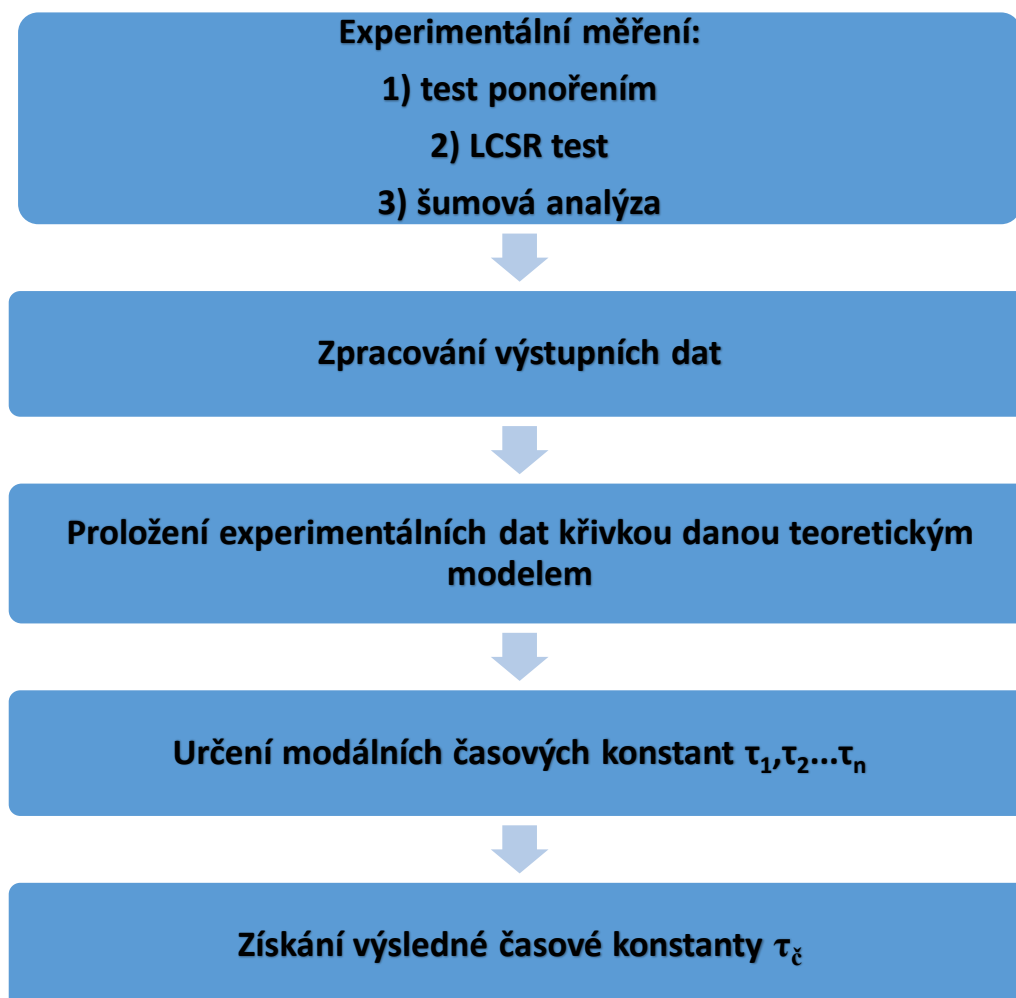
Lze ovšem s jistotou říci, že tato časová konstanta měřicího přístroje je oproti časové konstantě RTD řádově menší

$$\tau_{\check{c}} \gg \tau_{\check{e}el}.$$

V praxi se proto časová konstanta $\tau_{\check{e}el}$ zanedbává.

6. Metody určování časové konstanty

Časovou konstantu lze určit teoreticky či experimentálně. Pro teoretické stanovení časové konstanty je třeba mít k dispozici přesné charakteristiky (geometrické, materiálové apod) RTD a také vlastnosti tekutiny. To je ale velmi obtížné, jelikož se jedná o charakteristiky, které nelze určit zcela exaktně a navíc se mohou během provozu na JE výrazně měnit. Teorie je tedy jen prvním odhadem dynamického chování přístroje a musí být doplněna experimentálními daty, která lze získat několika metodami (test ponořením, loop current step response - LCSR test, šumová analýza). Po doplnění modelu dynamického chování systému o naměřená data lze získat časovou konstantu. Postup pro určení časové konstanty RTD je zobrazen na Obr. 22 [1].



Obr. 22: Určení časové konstanty RTD [1]

6.1. Dynamické vlastnosti měřících přístrojů

Dynamické vlastnosti měřících přístrojů popisují změny měřené veličiny v čase. Snímače musí být navrženy tak, aby co nejrychleji a nejpresněji sledovaly vstupní signál $x(\tau)$ na výstupu $y(\tau)$. Znalost dynamických vlastností je velmi důležitá pro měření veličin, jejichž hodnota

se rychle mění s časem a vstupuje například do bezpečnostních a regulačních systémů. K matematickému popisu vlastností dynamických systémů slouží diferenciální rovnice [11], [12]

$$a_n y^n + \dots + a_2 y^2 + a_1 y^1 + a_0 y = b_m x^m + \dots + b_2 x^2 + b_1 x^1 + b_0 x, \quad (6.1)$$

kde

$m \leq n$,

$a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ – koeficienty diferenciální rovnice,

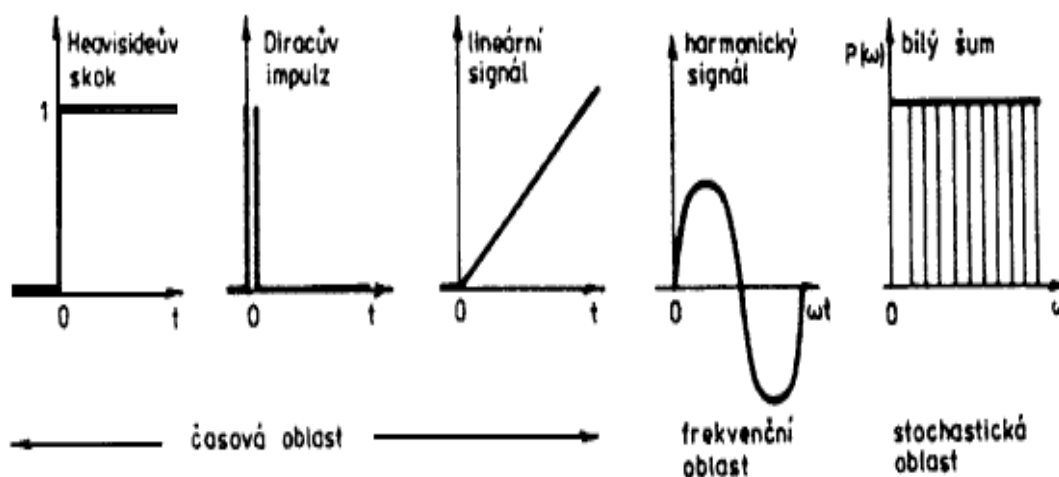
x – vstupní veličina,

y – výstupní veličina.

Podle nejvyššího řádu derivace výstupní veličiny se systémy rozdělují na systémy prvního, druhého nebo vyšších řádů.

Pro matematický popis chování dynamických systémů lze využít Laplaceovy transformace. Místo přímého řešení v originále (řešení soustavy diferenciálních rovnic) se nejprve přímou transformací převede úloha z originálu na úlohu v obraze (řešení soustavy algebraických rovnic), řeší se úloha v obraze a výsledky se zpětnou transformací převádějí zpět do originálu. Pro popis chování dynamických systémů se s výhodou používá výsledků odezvy na charakteristické vstupní signály [12]:

- jednotkový skok (Heavisideův skok) - odezvou je přechodová charakteristika,
- jednotkový impuls (Diracův impuls) - odezvou je impulsní charakteristika,
- signál s konstantní rychlostí změny (lineární signál) - odezvou je rychlostní charakteristika,
- harmonický signál - odezvou je harmonický přenos,
- bílý šum (signál s konstantní spektrální výkonovou hustotou v daném intervalu).



Obr. 23: Používané vstupní signály [2]

K měření dynamických vlastností RTD se využívá Heavisideův skok a také bílý šum.

K popisu systému je možné použít přenosovou funkci.



Obr. 24: Přenos systému

Přenosová funkce je definována jako podíl Laplaceových obrazů výstupního a vstupního signálu systému. Je závislá pouze na vlastnostech systému, a proto je vhodná k popisu jeho vlastností. V případě lineární diferenciální rovnice (6.1) je přenosová funkce racionální lomená funkce komplexní proměnné s , která má tvar [11], [12]

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + \dots b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots a_2 s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (6.2)$$

Jestliže polynomy v čitateli a ve jmenovateli vyjádříme ve tvaru kořenových činitelů c_m , resp. p_n , bude mít přenosová funkce tvar

$$G(s) = \frac{b_m (s - c_1)(s - c_2) \dots (s - c_m)}{a_n (s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)}. \quad (6.3)$$

Pokud jsou všechny kořenové činitele reálné, lze definovat tzv. modální časové konstanty $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ jako

$$p_n = -\frac{1}{\tau_n}. \quad (6.4)$$

Vztah (6.3) lze tedy vyjádřit pomocí modálních časových konstant

$$G(s) = \frac{b_0 (sT_1 + 1)(sT_2 + 1) \dots (sT_n + 1)}{a_0 (s\tau_1 + 1)(s\tau_2 + 1) \dots (s\tau_n + 1)}, \quad (6.5)$$

kde

$\frac{b_0}{a_0}$ - zesílení přístroje,

s - proměnná Laplaceovy transformace,

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ - modální časové konstanty,

T_1, T_2, \dots, T_n - časové konstanty jmenovatele.

Pro popis dynamických vlastností RTD je důležitý jmenovatel přenosové funkce.

Pro frekvenční oblast se definuje funkce frekvenčního přenosu, jež je dána jako podíl Fourierových obrazů výstupního a vstupního signálu systému. Funkce frekvenčního přenosu je komplexní funkcí a formálně má shodný tvar s přenosovou funkcí, dosadí-li se za $s = i\omega$ [11], [12]

$$G(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)} = \frac{b_m(i\omega)^m + \dots b_2(i\omega)^2 + b_1i\omega + b_0}{a_n(i\omega)^n + \dots a_2(i\omega)^2 + a_1i\omega + a_0}. \quad (6.6)$$

Analogicky dle vztahu (6.3) je možné funkci frekvenčního přenosu vyjádřit ve tvaru

$$G(i\omega) = \frac{b_m(i\omega - c_1)(i\omega - c_2) \dots (i\omega - c_m)}{a_n(i\omega - p_1)(i\omega - p_2) \dots (i\omega - p_n)}. \quad (6.7)$$

Stejně jako přenosovou funkci je možné funkci frekvenčního přenosu vyjádřit v závislosti na modálních časových konstantách

$$G(i\omega) = \frac{b_0(i\omega T_1 + 1)(i\omega T_2 + 1) \dots (i\omega T_n + 1)}{a_0(i\omega \tau_1 + 1)(i\omega \tau_2 + 1) \dots (i\omega \tau_n + 1)}, \quad (6.8)$$

kde

$\frac{b_0}{a_0}$ - zesílení přístroje,

$i\omega$ - komplexní proměnná,

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ - modální časové konstanty,

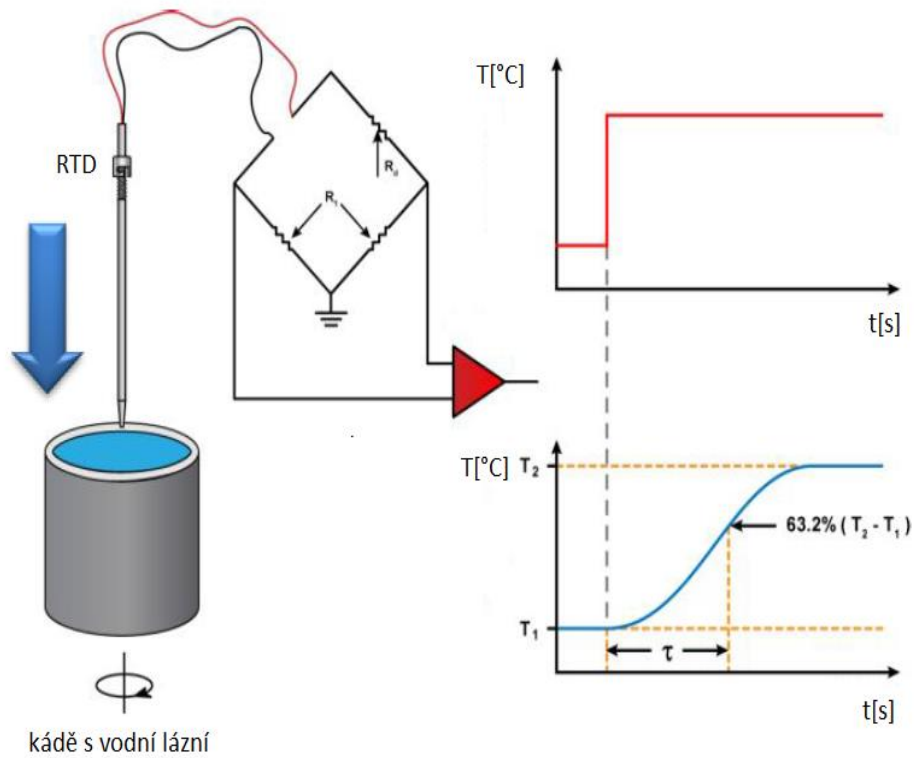
T_1, T_2, \dots, T_n - časové konstanty jmenovatele.

6.2. Test ponořením

Při testu ponořením je RTD o teplotě T_1 vložen do kádě s lázní o teplotě T_2 (přičemž $T_1 \neq T_2$), což zapříčiní skokovou změnu teploty. Tuto činnost je nutno provést velmi rychle, aby byl zachován charakter skokové změny teploty. Během testu je zaznamenávána přechodová charakteristika RTD, tedy odezva RTD na skokovou změnu teploty [1], [14].

Tento test se provádí v laboratoři, před vložením RTD do I.O. jaderné elektrárny. V laboratoři nelze nastolit shodné podmínky jako jsou při měření za provozu na jaderné elektrárně, ať už to jsou extrémní teploty, tlaky nebo průtoky v primárním okruhu. Proto je často nutné extrapolovat získané výsledky pro podmínky provozu. Toto vše vede k chybám určení časové konstanty pomocí testu ponořením. Pro test jsou v technických normách (ASTM Standard E644-09 - Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers, American Society for Testing and Material) dány podmínky, za jakých se má provádět [1], [14].

Obr. 25 znázorňuje princip testu ponořením. Skoková změna teploty je zapříčiněna vložením RTD do kádě s lázní okolního prostředí.

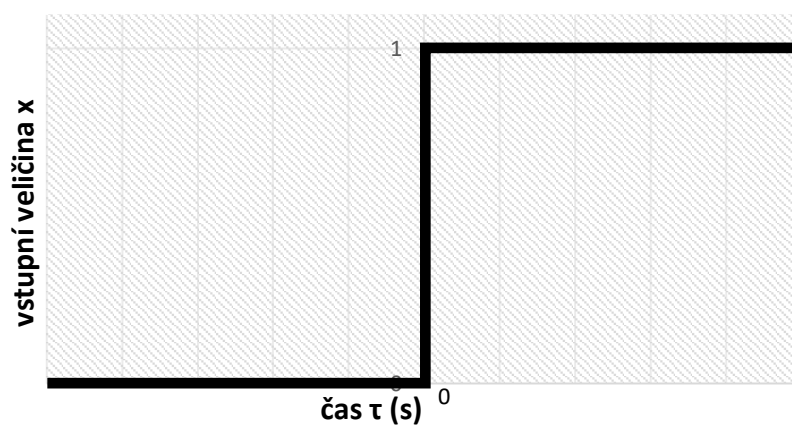


Obr. 25: Princip testu ponořením [1]

Graf 1 ilustruje kladnou skokovou změnu vstupního signálu definovanou ve tvaru

$$f(t = 0) = 0 ,$$

$$f(t > 0) = 1 .$$



Graf 1: Skoková (kladná) změna vstupní veličiny

Pro skokovou změnu vstupní teploty platí [1]

$$T_{\infty}(s) = \frac{a}{s}, \quad (6.9)$$

kde

T_{∞} -teplota tekutiny [°C],

a - amplituda skoku,

s - proměnná Laplaceovy transformace.

6.2.1 Jednoduchý systém

K určení výstupního signálu pro RTD popsaný diferenciální rovnicí 1. řádu se používá vztah (4.3)

$$\alpha(T_{\infty} - T)S = \rho cV \frac{dT}{d\tau}. \quad (6.10)$$

Laplaceovou transformací přejde rovnice do následujícího tvaru [1]

$$sT(s) - T(0) = p[T_{\infty}(s) - T(s)], \quad (6.11)$$

kde

$$p = \frac{1}{\tau_c} = \frac{\alpha S}{\rho cV},$$

s - proměnná Laplaceovy transformace.

Za předpokladu $T(0) = 0$ získá přenosová funkce přístroje tvar

$$G(s) = \frac{T(s)}{T_{\infty}(s)} = \frac{T(s)}{\frac{a}{s}} = \frac{p}{s + p}. \quad (6.12)$$

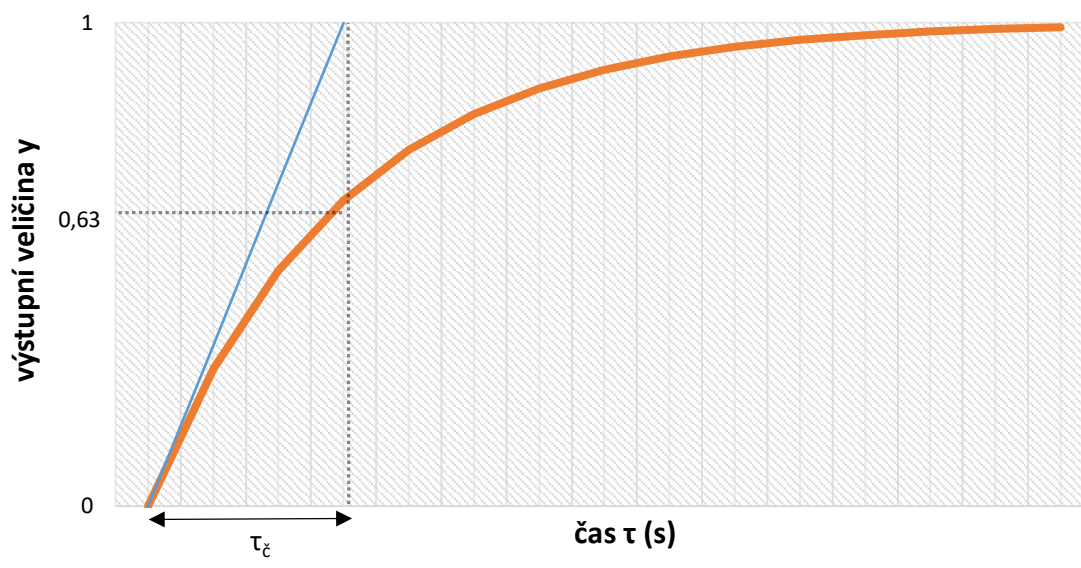
Výstupní signál v Laplaceových souřadnicích lze vyjádřit z předchozí rovnice

$$T(s) = \frac{pa}{s(s + p)} = a \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{(s + p)} \right]. \quad (6.13)$$

Zpětnou Laplaceovou transformací lze získat tzv. přechodovou charakteristiku

$$T(t) = a(1 - e^{-pt}). \quad (6.14)$$

Graf 2 ukazuje křivku odezvy, resp. přechodovou charakteristiku jednoduchého systému (tedy systému popsaného diferenciální rovnicí 1. řádu) na kladnou skokovou změnu vstupní veličiny.



Graf 2: Přejchodová charakteristika

Časová konstanta τ_ξ systému tvoří čas, za který odezva na skokovou změnu dosáhne velikosti 63,2 % ustálené hodnoty. Vyjadřuje dobu dosažení hodnoty ustálené výstupní veličiny v případě, že by rostla lineárně (modrá tečna). Po uplynutí $5\tau_\xi$ lze brát hodnotu výstupní veličiny za téměř totožnou s hodnotou vstupní veličiny. Této hodnotě se říká časová odezva snímače [9].

Pro zápornou skokovou změnu by byla přenosová funkce analogická jako při kladné skokové změně, ale s opačným znaménkem. Záporná skoková změna vstupního signálu má tvar

$$f(t = 0) = 1,$$

$$f(t > 0) = 0.$$

Přenosová funkce je

$$G(s) = \frac{T(s)}{T_\infty(s)} = \frac{T(s)}{-\frac{a}{s}} = -\frac{p}{s + p}. \quad (6.15)$$

Přejchodová charakteristika získá tento tvar

$$T(t) = a e^{-p\tau}. \quad (6.16)$$

6.2.2. Složený systém

Ve skutečnosti je snímač na JE uložen v pouzdře a v ochranné jímce. Nejdříve se musí ohřát ochranná jímka, poté pouzdro a nakonec samotný snímač teploty. Snímač reaguje

s daleko větším časovým zpožděním. Přechodová charakteristika reálného snímače je tedy popsána pomocí diferenciální rovnice vyšších řádů. Přenosová funkce dostává tvar [1]

$$G(s) = \frac{T(s)}{T_{\infty}(s)} = \frac{1}{(s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)}, \quad (6.17)$$

kde

$$p_1 = -\frac{1}{\tau_1}, p_2 = -\frac{1}{\tau_2} \dots p_n = -\frac{1}{\tau_n},$$

s - proměnná Laplaceovy transformace.

Výsledná časová konstanta τ_{ξ} je určena kombinací modálních časových konstant $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$.

Výstupní signál, tj. přechodová charakteristika teploměru, se získá zpětnou Laplaceovou transformací [1]

$$T(\tau) = \frac{1}{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_n)} \left[1 + \frac{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_n)}{p_1(p_1 - p_2) \dots (p_1 - p_n)} e^{-p_1\tau} + \frac{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_n)}{p_2(p_2 - p_1) \dots (p_2 - p_n)} e^{-p_2\tau} + \dots + \frac{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_n)}{p_n(p_n - p_2) \dots (p_n - p_n)} e^{-p_n\tau} \right]. \quad (6.18)$$

Pro čas $\tau = \infty$

$$T(\infty) = \frac{1}{(-p_1)(-p_2) \dots (-p_n)} = \tau_1\tau_2 \dots \tau_n. \quad (6.19)$$

Dosazením $\frac{T(\tau)}{T(\infty)}$

$$\begin{aligned} \frac{T(\tau)}{T(\infty)} &= 1 + \frac{\frac{1}{\tau_1\tau_2 \dots \tau_n}}{\frac{1}{-\tau_1} \left(\frac{1}{-\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \dots \left(\frac{1}{-\tau_1} + \frac{1}{\tau_n} \right)} e^{-\frac{1}{\tau_1}\tau} \\ &+ \frac{\frac{1}{\tau_1\tau_2 \dots \tau_n}}{\frac{1}{-\tau_2} \left(\frac{1}{-\tau_2} + \frac{1}{\tau_1} \right) \dots \left(\frac{1}{-\tau_2} + \frac{1}{\tau_n} \right)} e^{-\frac{1}{\tau_2}\tau} \\ &+ \dots + \frac{\frac{1}{\tau_1\tau_2 \dots \tau_n}}{\frac{1}{-\tau_n} \left(\frac{1}{-\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \dots \left(\frac{1}{-\tau_1} + \frac{1}{\tau_n} \right)} e^{-\frac{1}{\tau_n}\tau}. \end{aligned} \quad (6.20)$$

Pro určení časové konstanty z experimentálních dat získaných testem ponořením je nutné tato data proložit křivkou, která je popsána ve tvaru [1], [14]

$$T(\tau) = A_0 + A_1 e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} + \dots, \quad (6.21)$$

kde

A_0, A_1, A_2 - konstanty,

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ - modální časové konstanty [s],

$T(\tau)$ - teplota v čase τ [°C].

Na základě poznatků z praxe lze bezpečně říci, že hodnoty modálních časových konstant $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ postupně rapidně klesají. Největší příspěvek k celkové časové konstantě má modální časová konstanta τ_1 . Platí, že RTD je poměr $\frac{\tau_1}{\tau_2} > 4$. Proto je možné vztah (6.20) zjednodušit na [1]

$$\frac{T(\tau)}{T(\infty)} \approx 1 + \frac{1}{\frac{1}{-\tau_1} \left(\frac{1}{-\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \dots \left(\frac{1}{-\tau_1} + \frac{1}{\tau_n} \right)} e^{-\frac{1}{\tau_1} \tau}. \quad (6.22)$$

Dosadí-li se za $\frac{T(\tau)}{T(\infty)} = 0,632$ pro $\tau = \tau_\xi$, získá se vztah

$$e^{-\frac{\tau_\xi}{\tau_1}} = 0,368 \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \left(1 - \frac{\tau_3}{\tau_1} \right) \dots \left(1 - \frac{\tau_n}{\tau_1} \right). \quad (6.23)$$

Zlogaritmováním vztahu (6.23) lze vyjádřit celkovou časovou konstantu τ_ξ [1], [14]

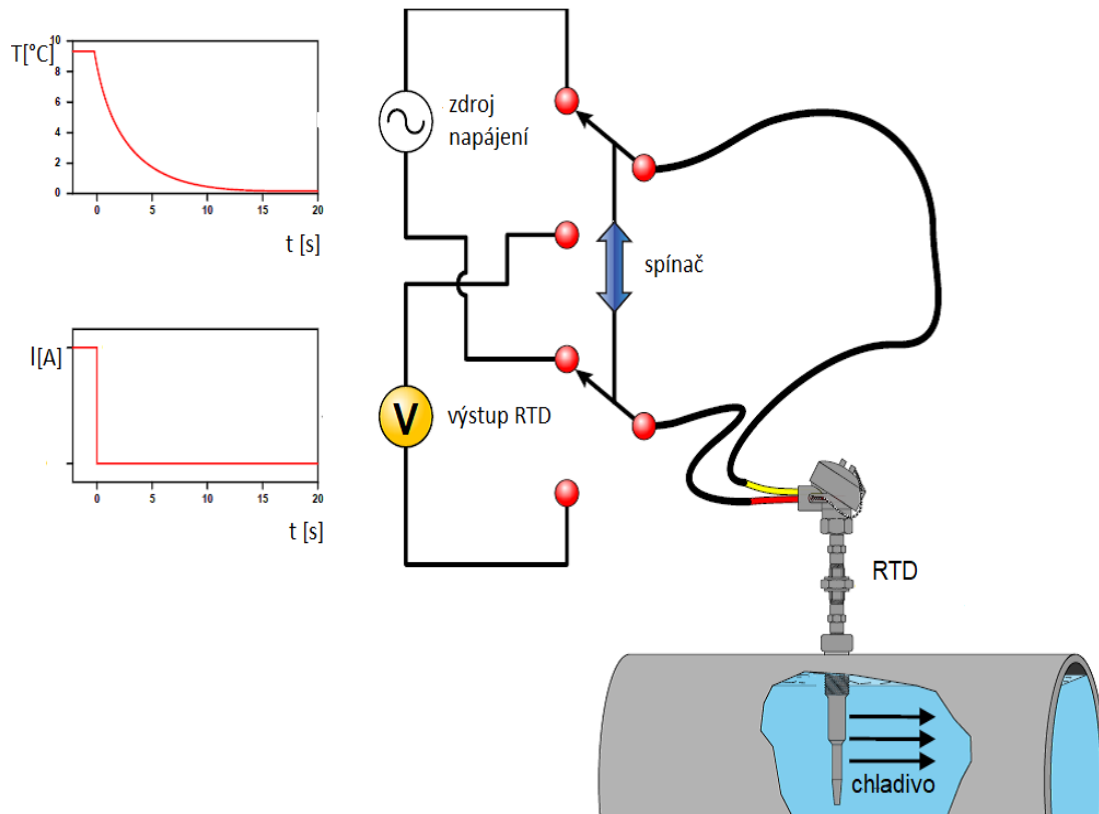
$$\tau_\xi = \tau_1 \left[1 - \ln \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) - \ln \left(1 - \frac{\tau_3}{\tau_1} \right) \dots - \left(1 - \frac{\tau_n}{\tau_1} \right) \right]. \quad (6.24)$$

6.3. LCSR test

Při LCSR (Loop Current Step Response) testu dochází taktéž ke skokové změně teploty, a to změnou elektrického proudu procházejícího přes RTD. Pomocí Wheatsonova můstku se spínačem se uvnitř RTD změni skokově velikost elektrického proudu z 1 – 2 mA na 30 – 50 mA. Tato změna elektrického proudu zapříčiní Jouleovým teplem postupné ohřátí RTD na teplotu cca o 10 – 20 °C vyšší, než je teplota okolního média. Po ohřátí RTD se spínač rozepne a měří se přechodová charakteristika RTD, resp. jak rychle se RTD ochladí na původní teplotu okolního prostředí. Vyhodnocování měření, resp. určení časové konstanty z experimentálních dat je analogické jako u testu ponořením [1], [14], [15].

Výhodou LCSR testu je, že ho lze provést za provozu jaderné elektrárny, tedy i za provozních podmínek. RTD se nevyjímá z ochranné jímky primárního okruhu.

Obr. 26 ilustruje princip LCSR testu realizovaného skokovou změnou elektrického proudu uvnitř RTD.

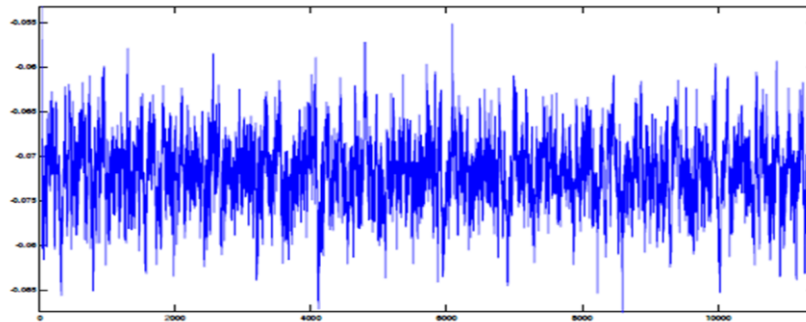


Obr. 26: Princip LCSR testu [1]

6.4. Šumová analýza

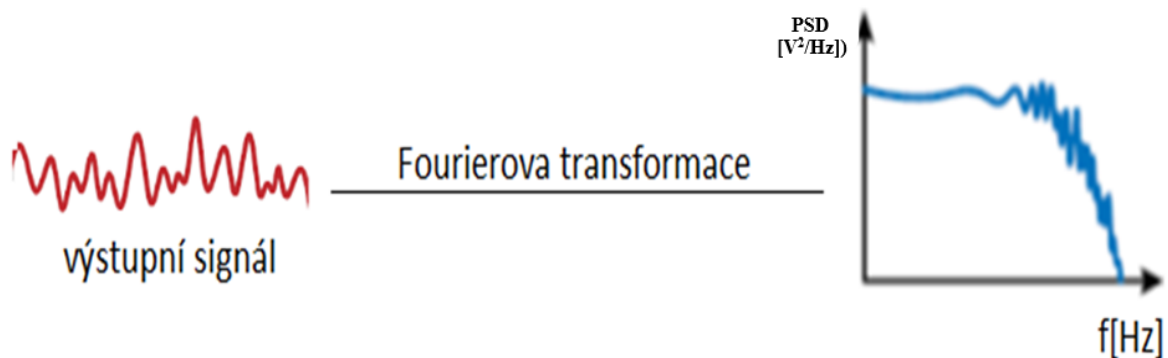
Princip šumové analýzy spočívá v měření signálu teplotních fluktuací chladiva primárního okruhu. Tyto tepelné fluktuace je možné podle teorie považovat do jisté míry za bílý šum. Bílý šum je náhodný signál s rovnoměrnou výkonovou spektrální hustotou (PSD – power spectrum density), který má stejný výkon v jakémkoli pásmu shodné šířky. Nekonečný frekvenční rozsah signálu bílého šumu je pouze teoretický. Kdyby byl nenulový výkon na všech frekvencích, celkový výkon takového signálu by byl nekonečný. V praxi je signál „bílý“, pokud má ploché spektrum v definovaném rozsahu frekvencí [3], [16], [17].

Výstupem měření teplotních fluktuací je časově proměnná hodnota elektrického napětí, jak ukazuje Obr. 28.



Obr. 27: Bílý šum [1]

Jelikož se jedná o náhodný (stochastický) signál, tzn. nelze určit, jakých hodnot nabude v jednotlivých časových okamžicích, je časově závislý signál převeden pomocí Fourierovy transformace do frekvenčně závislé spektrální výkonové hustoty (PSD), jak ilustruje Obr. 28. Průběh spektrální hustoty výkonu je důležitým nástrojem při popisu náhodných procesů a určuje výkon signálu odpovídající frekvenčnímu pásmu 1 Hz [16].



Obr. 28: Převedení výstupního časového signálu do spektrální výkonové hustoty [4]

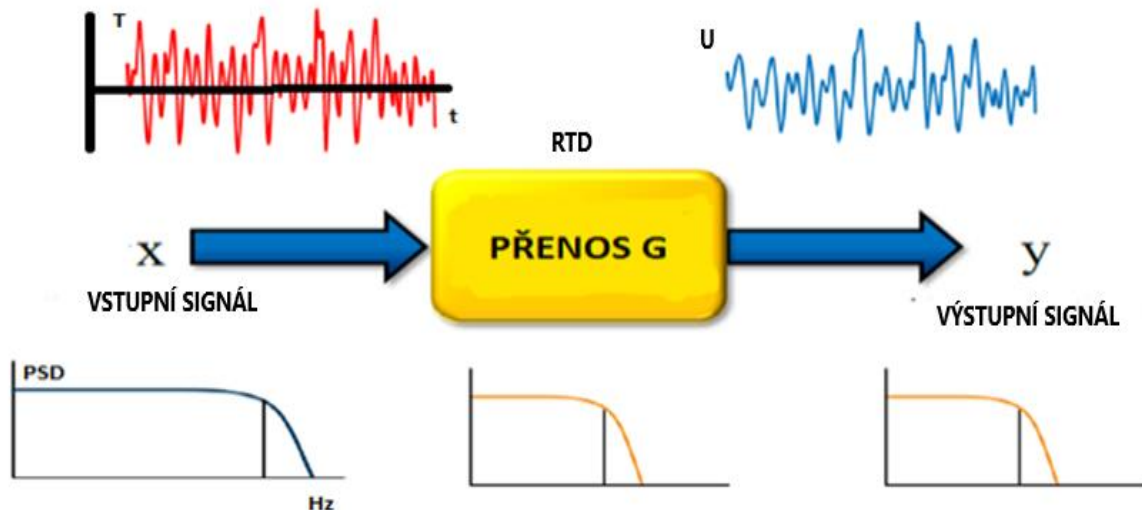
Výhodou šumové analýzy je stejně tak jako u LCSR testu možnost aplikace během provozu. RTD se tedy nevyjímá z ochranné jímky primárního okruhu a jsou tak zachovány všechny provozní parametry [18].

Vztah mezi funkcí frekvenčního přenosu a výstupní spektrální výkonovou hustotou (PSD_Y) resp. vstupní spektrální výkonovou hustotou (PSD_X) je následující [1]

$$|G(\omega i)|^2 = \frac{PSD_Y}{PSD_X}. \quad (6.25)$$

PSD se od amplitudového spektra liší tím, že je její druhou mocninou. Pokud se jedná o bílý šum, tedy $PSD_X = konstanta$, je vztah (6.25) přepsán do následujícího tvaru [1]

$$konstanta \cdot |G(\omega i)|^2 = PSD_Y. \quad (6.26)$$



Obr. 29: Vztah mezi $G(\omega)$ a PSD [4]

6.4.1 Jednoduchý systém

Funkce frekvenčního přenosu vyjádřená pro jednoduchý RTD [1]

$$G(\omega j) = \frac{1}{\omega i \tau_{\zeta} + 1}, \quad (6.27)$$

kde

ω - úhlová frekvence [s^{-1}],

i - imaginární jednotka ($i = \sqrt{-1}$),

τ_{ζ} - časová konstanta [s].

Velikost (magnituda) přenosové funkce je dána vztahem [1]

$$|G| = \left(\frac{1}{\omega^2 \tau_{\zeta}^2 + 1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6.28)$$

Časová konstanta se získá položením $|G| = \frac{\sqrt{2}}{2}$. Tedy

$$\frac{\sqrt{2}}{2} = \left(\frac{1}{\omega_0^2 \tau_{\zeta}^2 + 1} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6.29)$$

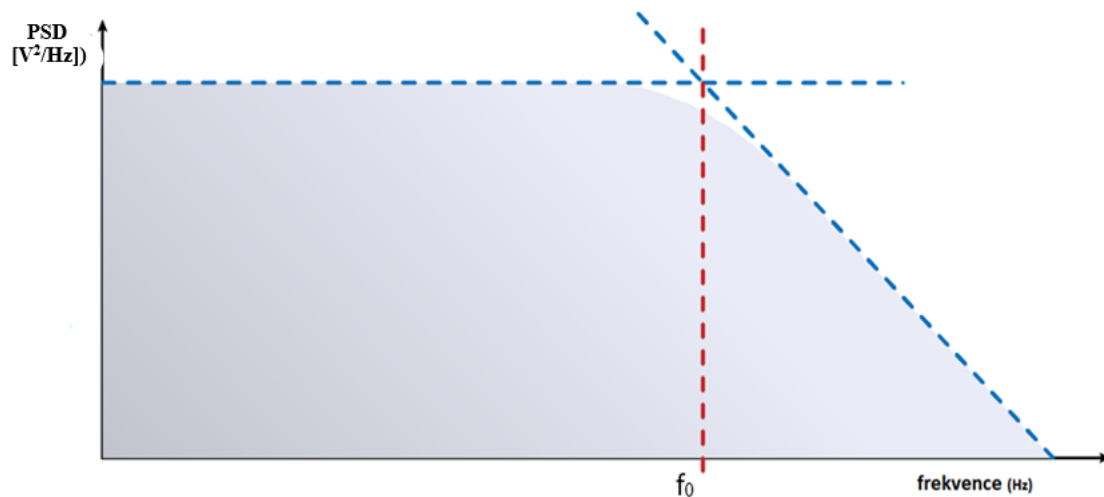
Tímto dosazením a úpravou je docíleno následujícího vztahu [1]

$$\tau_{\zeta} = \frac{1}{\omega_0} = \frac{1}{2\pi f_0}, \quad (6.29)$$

kde

π - Ludolfovo číslo[-],
 ω_0 - mezní úhlová frekvence[s⁻¹],
 f_0 - mezní frekvence [Hz].

Mezní frekvence je určena jako taková hodnota frekvence, při které klesne přenos o 3dB (výkon klesne na polovinu). Obr. 30 ukazuje, jak se stanovuje pomocí šumové analýzy časová konstanta jednoduchého RTD popsaného diferenciální rovnicí 1. řádu [16].



Obr. 30: Určení časové konstanty – jednoduchý systém [1]

6.4.2 Složený systém

Pro složený RTD (např. RTD uložený v ochranné jímce) je funkce frekvenčního přenosu popsána následovně [1]

$$G(\omega i) = \frac{1}{(\omega i \tau_1 + 1)(\omega i \tau_2 + 1) \dots (\omega i \tau_n + 1)}, \quad (6.30)$$

kde

ω - úhlová frekvence [s⁻¹],
 i - imaginární jednotka ($i = \sqrt{-1}$),
 τ_1, \dots, τ_n – modální časové konstanty [s].

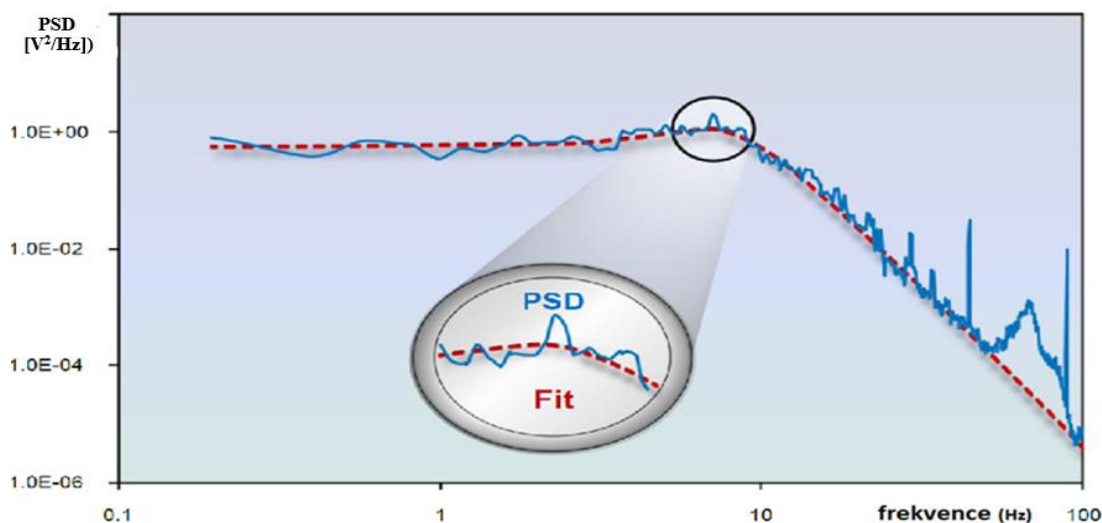
Velikost (magnituda) přenosové funkce je dána vztahem [1]

$$|G| = \left(\frac{1}{(\omega^2 \tau_1^2 + 1)(\omega^2 \tau_2^2 + 1) \dots (\omega^2 \tau_n^2 + 1)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.32)$$

kde

ω - úhlová frekvence [s⁻¹],
 τ_1, \dots, τ_n – modální časové konstanty [s].

K určení časové konstanty složeného RTD je nejdříve nutné proložit získanou spektrální výkonovou hustotu (PSD [V^2/Hz]) křivkou, jež vychází ze vztahu (6.26) a (6.30).



Obr. 31: Fit spektrální výkonové hustoty [1]

Výsledná časová konstanta se stejně jako u jednoduchého systému získá položením $|G| = \frac{\sqrt{2}}{2}$. Po dosazení vznikne algebraická rovnice n-tého řádu, kterou je nutno řešit [1].

Časová konstanta je opět dána výrazem

$$\tau_{\check{c}} = \frac{1}{\omega_0}, \quad (6.33)$$

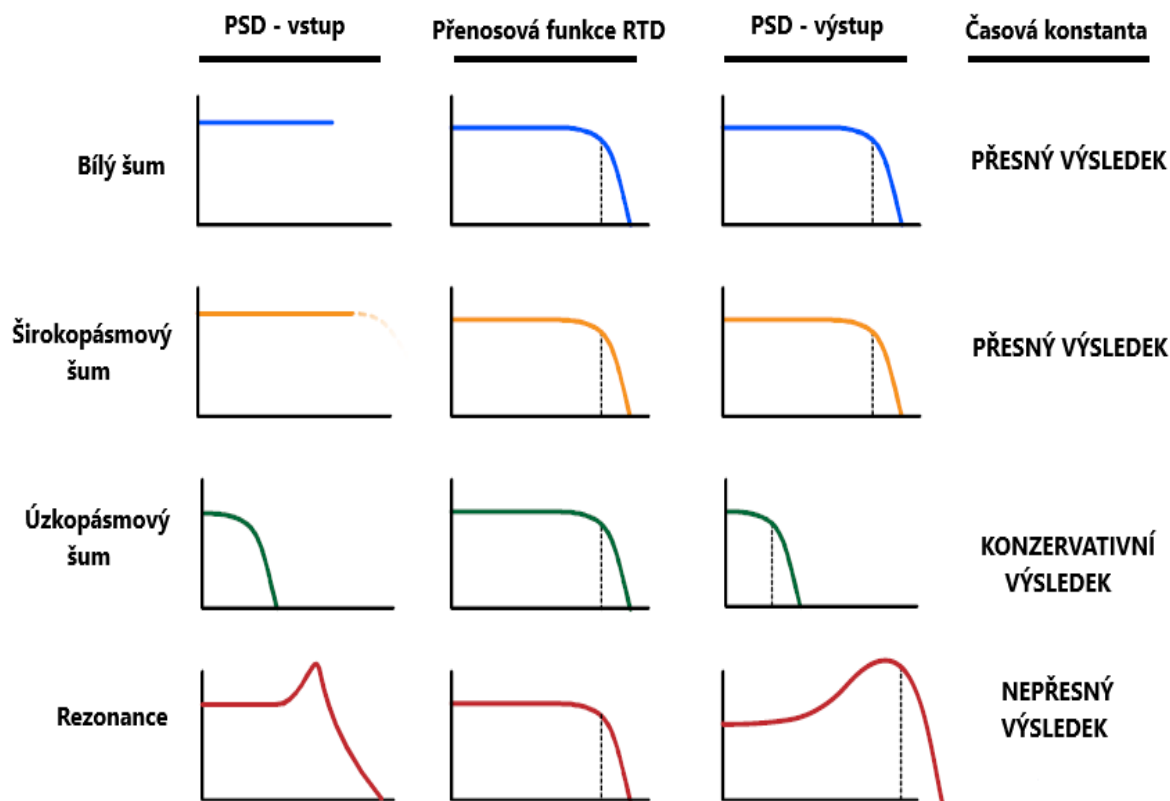
kde

ω_0 - mezní úhlová frekvence [s^{-1}].

6.4.3 Podmínky šumové analýzy

Metodu šumové analýzy pro zjištění dynamických vlastností RTD je možné použít v případě splnění dvou níže popsanych podmínek [1], [17]:

- 1) Amplitudová hustota pravděpodobnosti (APD) naměřeného tepelného šumu musí mít charakter Gaussovy (normální) distribuce.
- 2) Šumová analýza produkuje přesné výsledky jen, když lze předpokládat, že tepelný šum má charakter bílého šumu. Přesněji to znamená že, má konstantní spektrum v určité šířce pásma (alespoň v dekadě). Pokud tomu tak není, hodnoty časové konstanty vyjdou větší, než doopravdy jsou. V tomto případě jde o konzervativní (ale nepřesný) přístup stanovení dynamických charakteristik RTD.



Obr. 32: Přesnost výsledku v závislosti na vstupním signálu – šumová analýza [1]

6.5. Metody používané ve světě

V 60. letech 20. století, kdy vznikaly komerční jaderné elektrárny po celém světě, ještě nebylo v technických požadavcích vyžadováno periodické měření dynamických vlastností smyčkových teploměrů. Během provozování jaderných elektráren bylo ovšem zjištěno, že dochází u teploměrů k tzv. stárnutí (viz kapitola 5). Dynamické vlastnosti teploměrů se vlivem provozu časem zhoršují. Jako výsledek tohoto poznatku byl koncem 70. let zaveden požadavek periodického měření dynamických vlastností smyčkových teploměrů a dalších senzorů měřících důležité veličiny z hlediska řízení a bezpečnosti jaderné elektrárny. Právě z důvodu periodických měření dynamických vlastností vybraných snímačů na JE se začaly rozvíjet tzv. in - situ metody, tedy metody vykonané během provozu [1], [7].

Mnoho let byly teploměry testovány v laboratořích pomocí testu ponořením. Tímto testem je určeno, zda dynamické vlastnosti teploměru splňují dané technickými požadavky. Toto měření je vykonáno před prvním vložením RTD do provozu. Bohužel tato metoda neodráží podmínky, ve kterém je RTD provozován. Získané dynamické vlastnosti v laboratorních podmínkách tedy nekorrespondují s dynamickými vlastnostmi teploměru uloženého v jímce během provozu. Tato metoda je tedy prospěšná především pro srovnání dynamických vlastností jednotlivých teploměrů. Navíc, pokud by tato metoda byla aplikována pro periodické ověřování dynamických vlastností RTD, docházelo by k určité radiační expozici pracovníků. Po určité době provozu JE totiž dochází k aktivaci materiálu RTD uloženého v primárním okruhu [1].

Právě proto se začala v 70. letech rozvíjet metoda vykonaná za provozních podmínek jako je LCSR test. Poprvé byl LCSR test v jaderné aplikaci použit pro určení časové konstanty termočlánků v rychlých reaktorech chlazených roztavenými kovy ve druhé polovině 70. let.

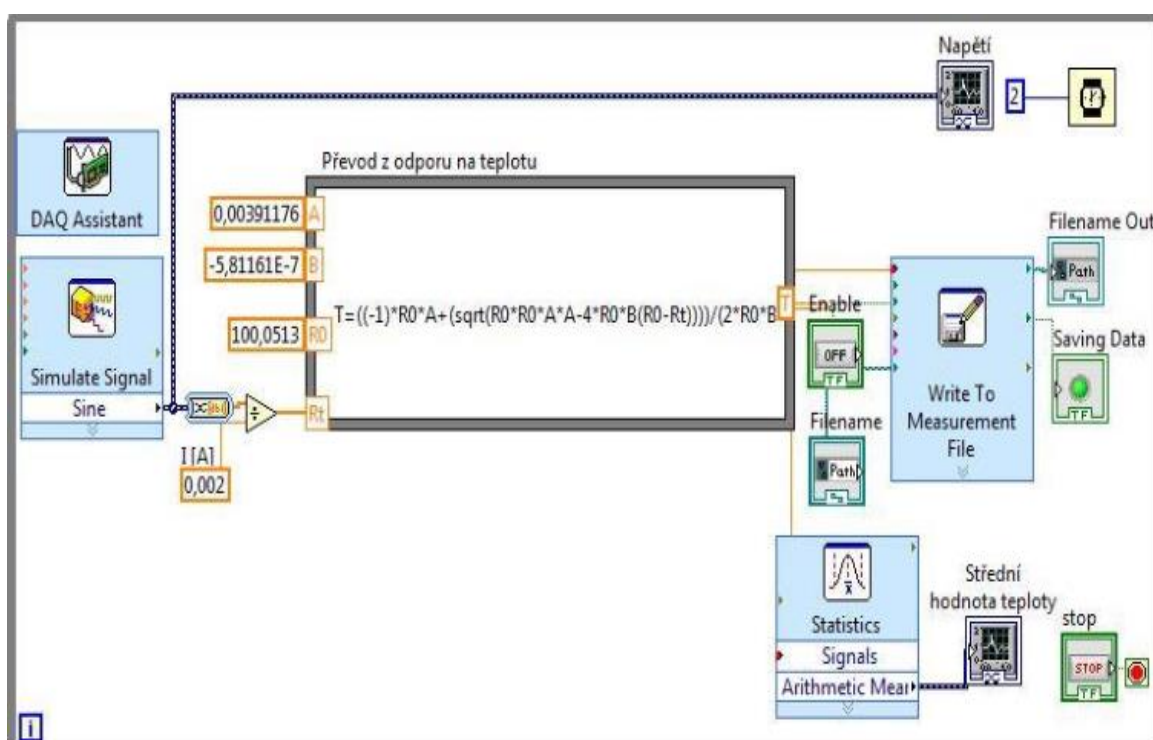
Na začátku 90. let se zejména k určení dynamických vlastností tlakových snímačů v primárním okruhu jaderných elektráren začala používat metoda šumové analýzy, která je další metodou pro zjišťování dynamických vlastností odrážející provozní podmínky. Využití šumové analýzy pro ověření dynamických vlastností RTD je nyní především ve fázi ověřování. To znamená, že se po celém světě porovnávají výsledky získané testem ponořením či LCSR testem s výsledky získanými pomocí šumové analýzy. Většina výsledků velmi dobře koreluje [1].

7. Experimentální určení časové konstanty RTD pomocí testu ponořením

Určení časové konstanty měřeného RTD bylo realizováno v laboratoři ÚJV Řež a.s. Test ponořením spočíval ve vyvolání teplotního skoku rychlým vložením ohřátého RTD do studené vody. Měřicím softwarem byla zaznamenávána jeho přechodová charakteristika. Získané experimentální data byla následně proložena funkcí danou teoretickým modelem. Výsledná funkce, resp. její parametry určují dynamické charakteristiky RTD. Pro vyhodnocení časové konstanty byl v programu Gnuplot vytvořen skript.

7.1. Měření

Před samotným měřením byl v programu NI LabView vytvořen měřicí software, který posloužil ke zpracování a zaznamenání výstupního signálu.



Obr. 33: Měřicí software – NI LabView

Při měření byly použity následující přístroje a vybavení:

- PC s nainstalovaným softwarem NI LabView,
- měřicí karta,
- NI PXI – 1031 DC,
- zdroj napětí,
- RTD - odporový platinový teploměr (Pt100) s jímkou,
- propojovací kabeláž,

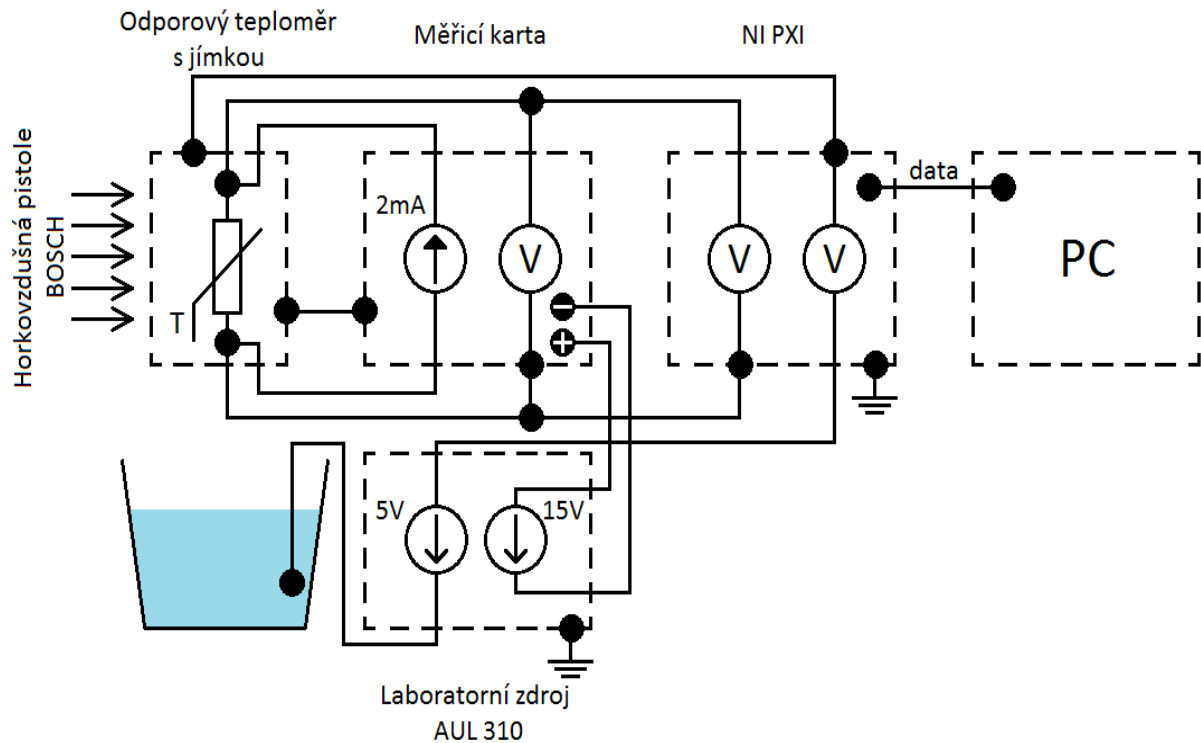
- kádě s vodou a míchacím aparátem,
- horkovzdušná pistole.



Obr. 34: Pracoviště ÚJV Řež a.s. – test ponořením

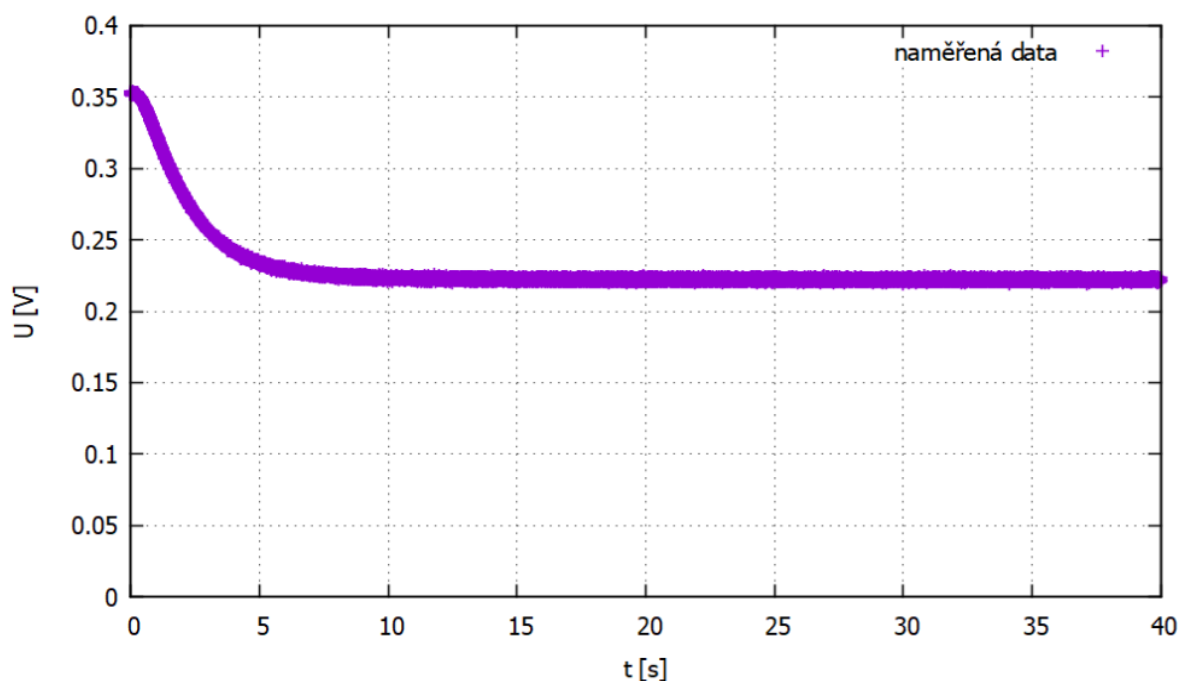
Postup měření lze shrnout do následujících bodů:

- 1) **Zapojení měřicího řetězce:** Nejdříve bylo nutné zapojit měřící řetězec. RTD byl pomocí potřebné kabeláže a měřící karty propojen s PC, jenž obsahoval měřící software (vytvořený v NI LabView). Obr. 35 názorně schematicky popisuje zapojení celého měřicího řetězce. Po úspěšném zapojení již bylo možné zaznamenávat výstupní signál z RTD.
- 2) **Teploní skok:** Ohřátí RTD bylo provedeno pomocí horkovzdušné pistole na teplotu 200 °C. Po ustálení výstupního signálu byl v čase $t = 0$ (signalizace dotyku jímky s hladinou vody) ohřátý RTD vložen do kádě s vodou, která měla teplotu okolí. Díky tomuto úkonu došlo ke skokové změně teploty na RTD. Voda byla po celou dobu míchána, aby bylo docíleno přibližně rychlosti 1 m/s.

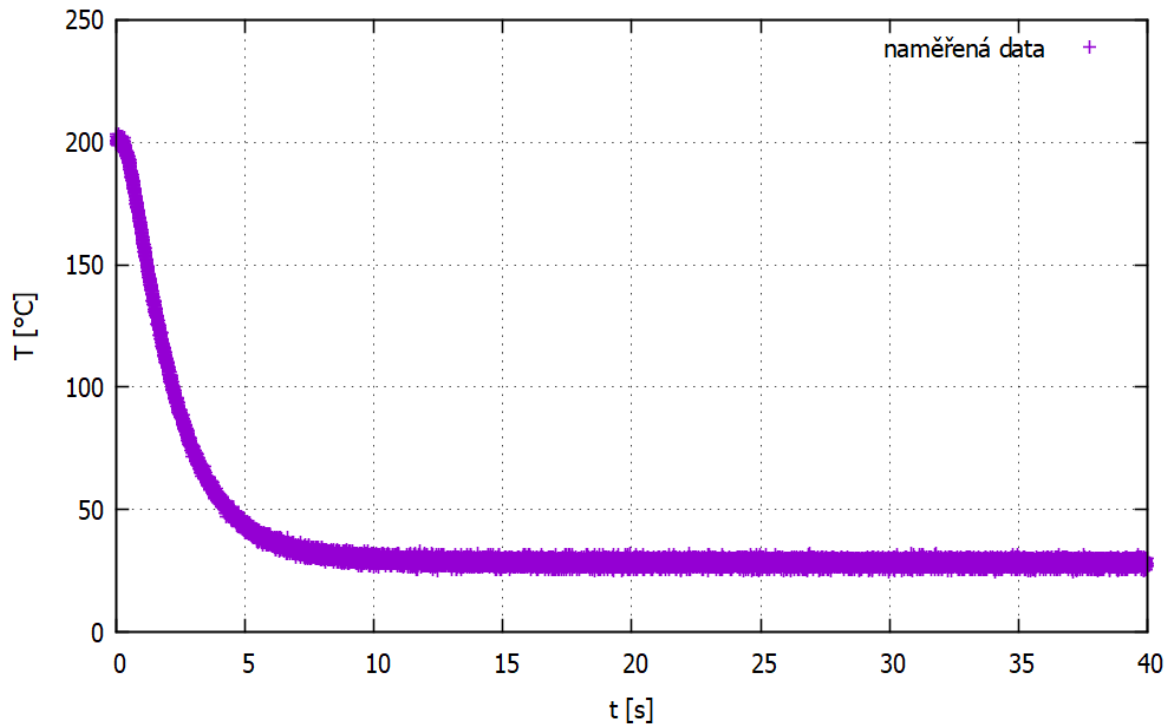


Obr. 35: Schéma zapojení – test ponořením

3) **Záznam přechodové charakteristiky:** Měřícím softwarem byla po dobu celého testu ponořením zaznamenávána přechodová charakteristika RTD, již ukazuje Graf 1, resp. Graf 2. Doba měření je závislá na charakteru přechodové charakteristiky. Měření probíhalo dostatečně dlouhou dobu.



Graf 1: Přechodová charakteristika RTD – napětí



Graf 2: Přechodová charakteristika RTD – teplota

7.2. Vyhodnocení

Jelikož je vztah pro platinový RTD mezi elektrickým odporem a teplotou téměř lineární, (viz Obr. 10) je možné vyhodnocovat přechodovou charakteristiku elektrického napětí v závislosti na čase. To znamená, že není potřebné přepočítávat získané elektrické napětí na teplotu.

Pro určení časové konstanty je potřebné proložit získanou přechodovou charakteristiku vhodnou funkcí danou teoretickým modelem. Tuto funkci popisuje vztah (6.21). Experimentální data byla proložena funkcí

$$T(\tau) = A_0 + A_1 e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} - A_2 e^{-\frac{\tau}{\tau_2}} ,$$

kde

τ_1, τ_2 - modální časové konstanty [s],

A_0, A_1, A_2 - konstanty (jsou funkcí modálních časových konstant),

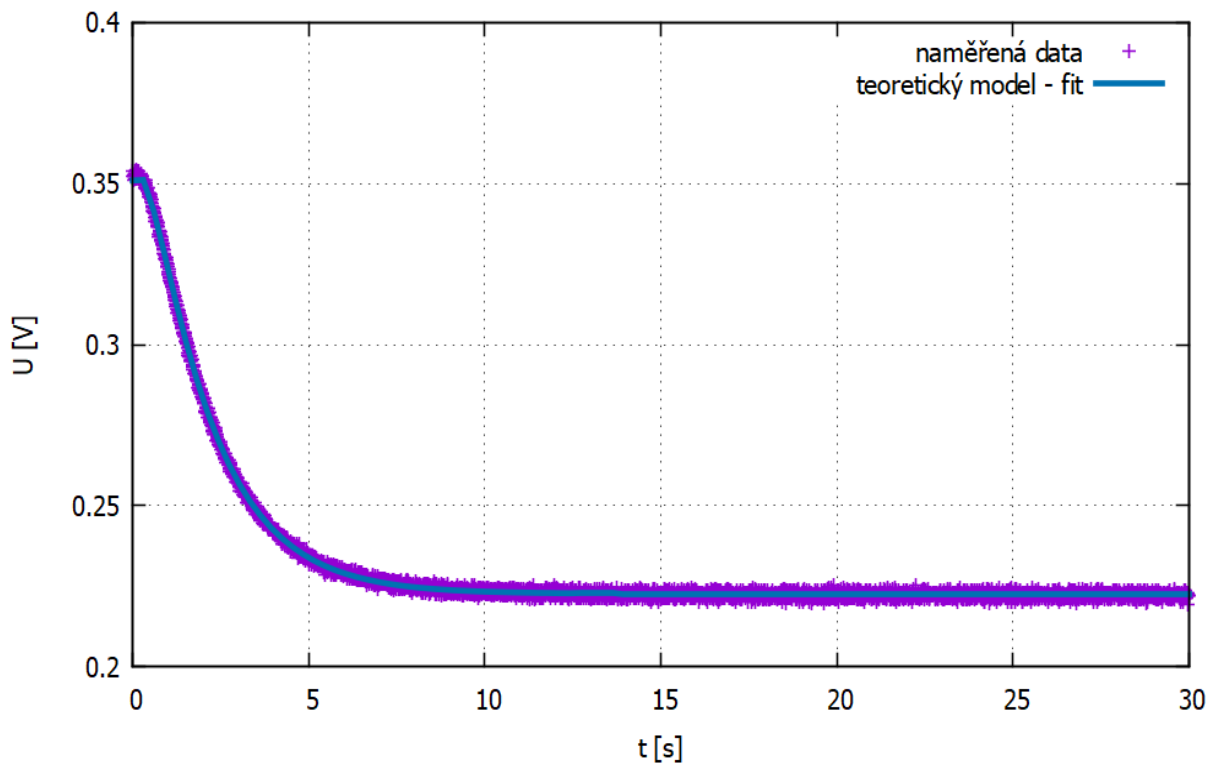
$T(\tau)$ - teplota v čase τ [°C].

Tato funkce charakterizuje systém 2. řádu. V praxi se pro RTD vyhodnocují pouze dvě významné modální časové konstanty. Jedna modální časová konstanta charakterizuje odporový snímač jako takový, druhá časová konstanta charakterizuje jímku, v níž je odporový snímač uložen.

Fit funkce charakterizující 1. řád neprokládá přesně naměřená data, poněvadž se nejedná o jednoduchý systém. Fit funkce charakterizující 3. a vyšší řád nekořespondoval s teorií

popсанou v kapitole 6.2. Další časové konstanty τ_3, \dots, τ_n se rovnaly předchozím časovým konstantám τ_1 a τ_2 . Dle teorie ovšem pro RTD platí, že $\frac{\tau_n}{\tau_{n-1}} > 4$.

Fit přechodové charakteristiky funkcí danou teoretickým modelem je v Graf 3. Pro fit přechodové charakteristiky byla využita data pro časový interval od $t = 0$ s do $t = 20$ s.



Graf 3: Fit přechodové charakteristiky

Ze získané funkce byly zjištěny modální časové konstanty τ_1 a τ_2 , jejichž hodnoty jsou shrnuty v Tab. 2.

Tab. 2: Modální časové konstanty – test ponořením

τ_1	τ_2
1,78 s	0,45 s

Z těchto modálních časových konstant se výsledná časová konstanta τ_{ξ} určí dle vztahu (6.24). Tedy

$$\tau_{\xi} = \tau_1 \left[1 - \ln \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \right].$$

Hodnota časové konstanty získaná pomocí testu ponořením byla vyhodnocena jako $\tau_{\zeta} = 2,29$ s. Zpracování dat, fit a výpočet časové konstanty byl proveden pomocí vytvořeného skriptu pro program Gnuplot.

Pro ověření správnosti výsledku byla časová konstanta vyhodnocena další metodou, která vzhledem k rozsahu není podrobně popsána. Jedná se o Strejcovu metodu. Více informací o této metodě lze nalézt např. v publikaci [19].

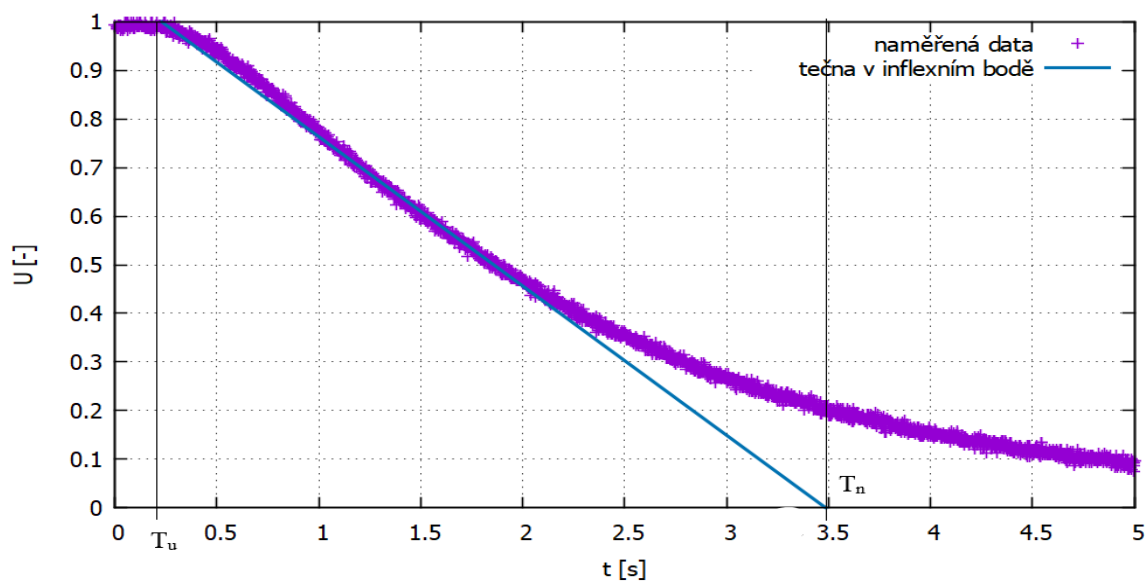
Stručný postup k určení modálních časových konstant Strejcovou metodou byl následující:

- Z normované přechodové charakteristiky byl numericky stanoven inflexní bod, kterým byla vedena tečna, která protne přímkou 0 a 1. Tak byla získána doba průtahu T_u , resp. doba náběhu T_n .
- Poněvadž

$$\tau_u = \frac{T_u}{T_n} \leq 0,104 ,$$

jedná se o tvar obrazového přenosu v následující podobě

$$G(s) = \frac{a}{(s\tau_1 + 1)(s\tau_2 + 1)} .$$



Graf 4: Stanovení doby náběhu T_n a doby průtahu T_u

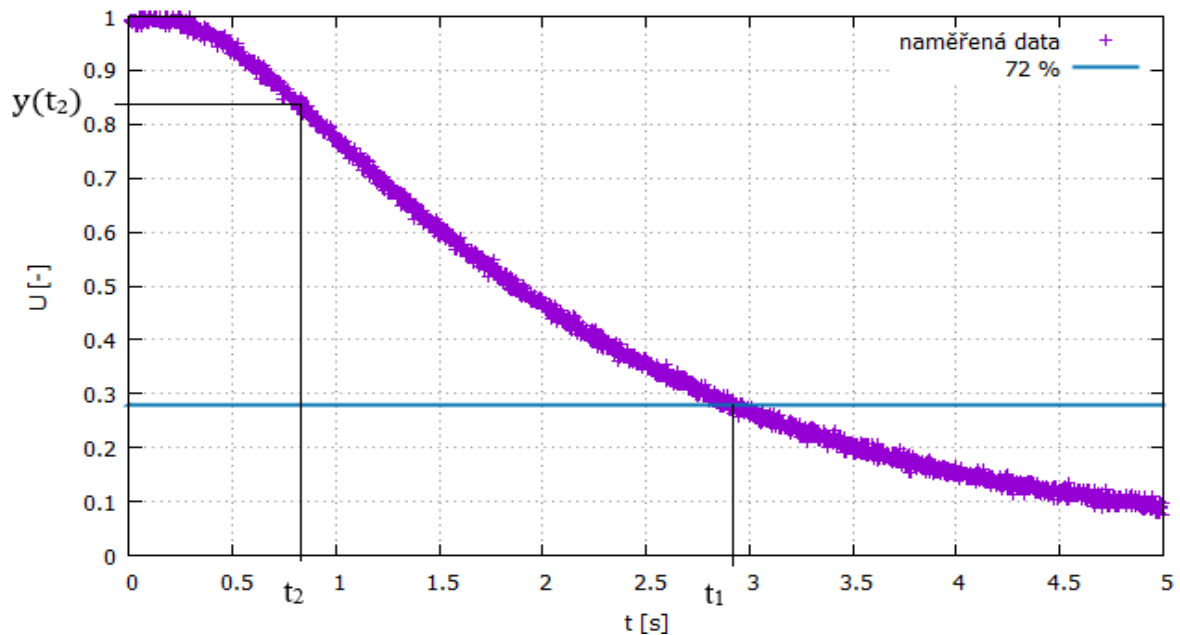
- Dále bylo zjištěno, za jakou dobu t_1 přechodová charakteristika dosáhne 72% ustálené hodnoty

$$t_1 = 1,2564(\tau_1 + \tau_2) .$$

- Byla spočtena hodnota t_2 z hodnoty t_1 pomocí vztahu

$$t_2 = 0,3574(\tau_1 + \tau_2) .$$

- Byla zjištěna hodnota přechodové charakteristiky odpovídající času t_2



Graf 5: Určení t_1 a $y(t_2)$

- Dle Strejcových tabulek byla podle hodnoty $y(t_2)$ vybrána nejbližší hodnota τ .

$y(t_2)$	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26
τ	0,0000	0,0228	0,0435	0,0635	0,0837
$y(t_2)$	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21
τ	0,1049	0,1280	0,1539	0,1838	0,2196
$y(t_2)$	0,20	0,19	0,18	0,17	0,1611
τ	0,2639	0,3216	0,4031	0,5378	1,0000

Obr. 36: Strejcová tabulka [19]

- Hodnoty časových konstant τ_1 a τ_2 byly získány z následujících dvou rovnic

$$\tau = \frac{\tau_2}{\tau_1}$$

a

$$\frac{t_1}{1,2564} = \tau_2 + \tau_1 .$$

Tab. 4 ukazuje modální časové konstanty vypočtené pomocí aproximační Strejcovy metody.

Tab. 3: Modální časové konstanty – test ponořením (Strejcova metoda)

τ_1	τ_2
1,74 s	0,52 s

Z modálních časových konstant τ_1 a τ_2 byla výsledná časová konstanta τ_ζ určena dle vztahu (6.24). Výsledná časová konstanta $\tau_\zeta = \mathbf{2,38}$ s.

8. Experimentální určení časové konstanty RTD pomocí šumové analýzy

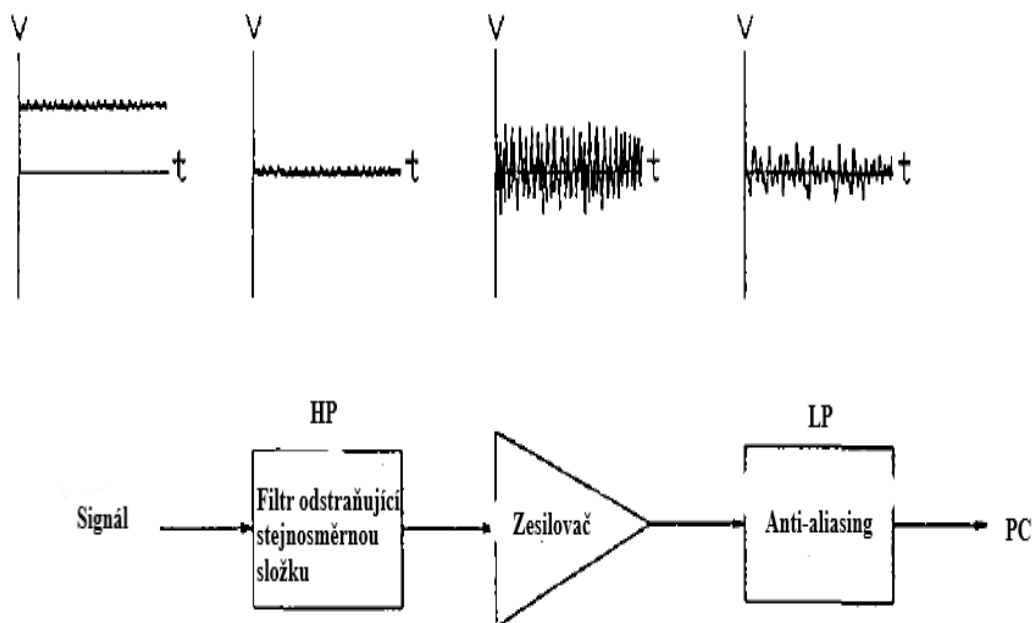
Po experimentálním určení časové konstanty RTD pomocí testu ponořením v laboratoři ÚJV Řež a.s. byl teploměr vložen do jedné ze čtyř horkých smyček primárního okruhu bloku ETE.

Pomocí šumové analýzy byly zjištěny dynamické vlastnosti RTD za provozních podmínek. Šumová analýza spočívá v měření teplotního šumu na smyčce primárního okruhu. Předpokládá se, že tento šum lze dostatečně charakterizovat jako bílý šum. Vyhodnocení dynamických vlastností RTD je určeno ze spektrální výkonové hustoty (power spectrum density - PSD). Naměřená PSD je proložena funkcí danou teoretickým modelem. Z této funkce jsou získány parametry charakterizující dynamické vlastnosti RTD.

8.1. Měření

Měření teploty smyčkového RTD na Jaderné elektrárně Temelín probíhalo po dobu 2 hodin. Doba měření musí být dostatečně dlouhá, aby byly ve výsledném naměřeném spektru obsaženy nízké frekvence. Měření tepelného šumu na horkých smyčkách je díky větší flukтуаční složce lepší než měření na smyčkách studených.

Vstupní signál je nutné dále řádně zpracovat tak, jak ukazuje Obr. 37.



Obr. 37: Zpracování signálu - šumová analýza [4]

Postup zpracování signálu probíhá v následujících krocích:

- Pomocí filtru s horní propustí (HP) odstraněna stejnosměrná složka signálu. Filtr s horní propustí přenáší lépe vyšší frekvence a nižší frekvence potlačuje.

- Signál zesílen pomocí zesilovače. Vstupní signál se musí upravit na vhodnou velikost - nejčastěji $0 \div \pm 10 \text{ V}$.
- Signál musí být také ochráněn před tzv. aliasingem (zkreslením signálu). Toto se zajišťuje tzv. antialiasing filtrem – což je v podstatě filtr s dolní propustí (LP). Bez aplikace antialiasing filtru by v dalším zpracování mohl proniknout do spektra signál, jenž v původním nebyl a došlo by ke zkreslení. Podle Shannon – Kotelnikova vzorkovacímu teorému musí být splněn tento vztah

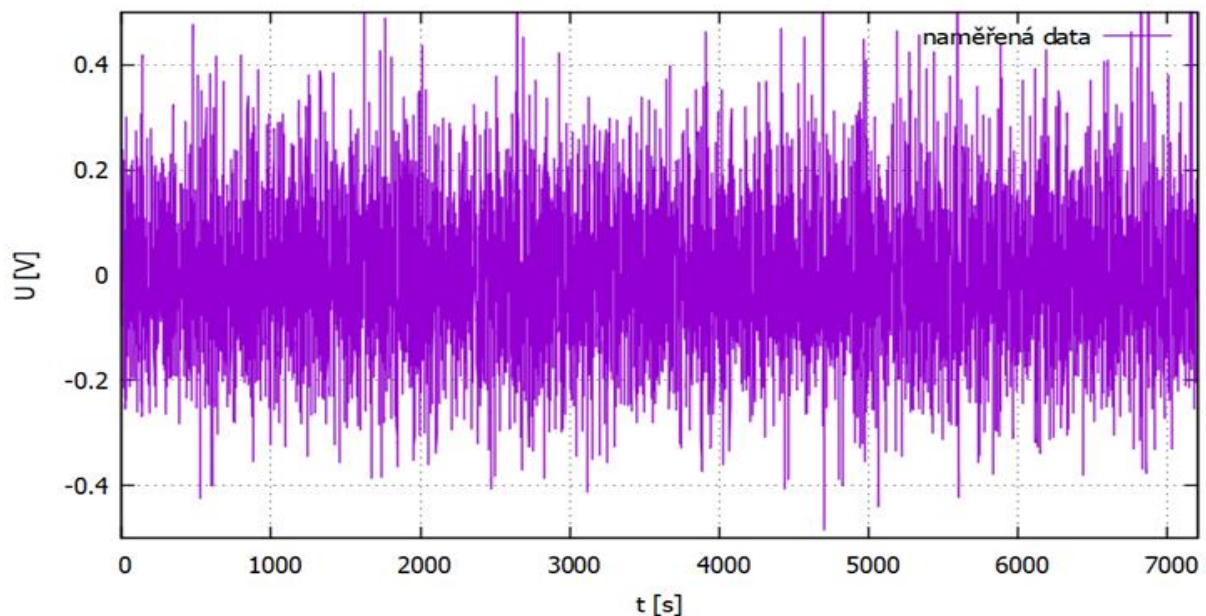
$$f_{vz} \geq 2 f_{max} ,$$

kde

f_{vz} – vzorkovací frekvence signálu,

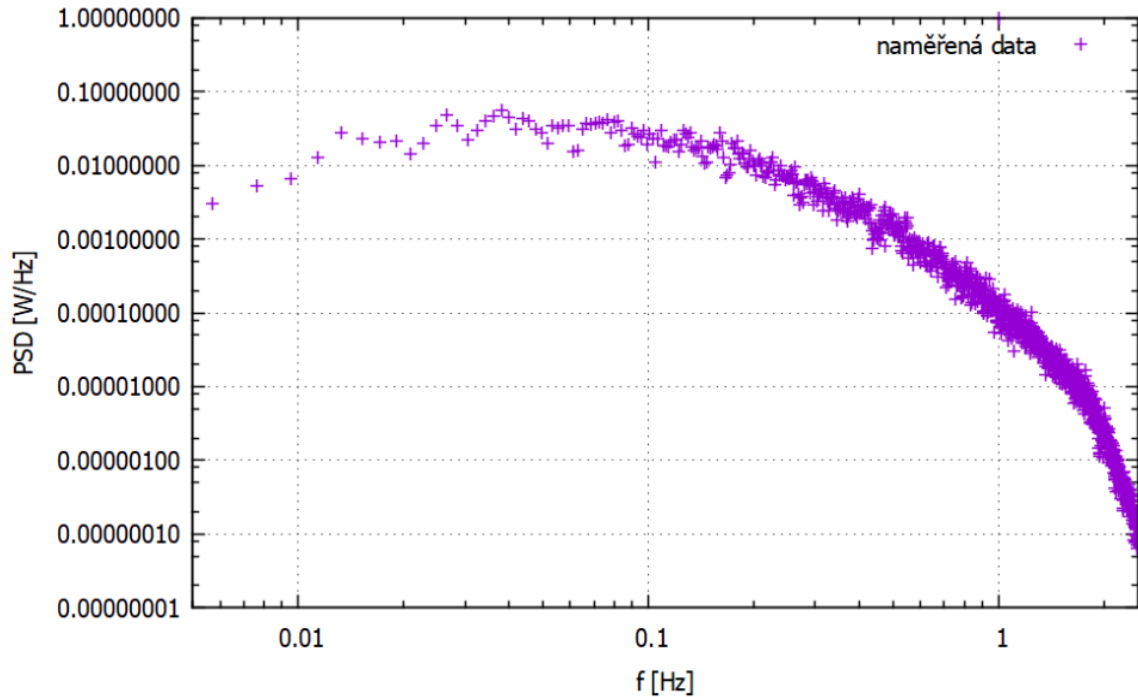
f_{max} – maximální frekvence obsažena v signálu.

Graf 6 ukazuje naměřený tepelný šum smyčkového RTD uloženého v primárním okruhu ETE.



Graf 6: Tepelný šum RTD

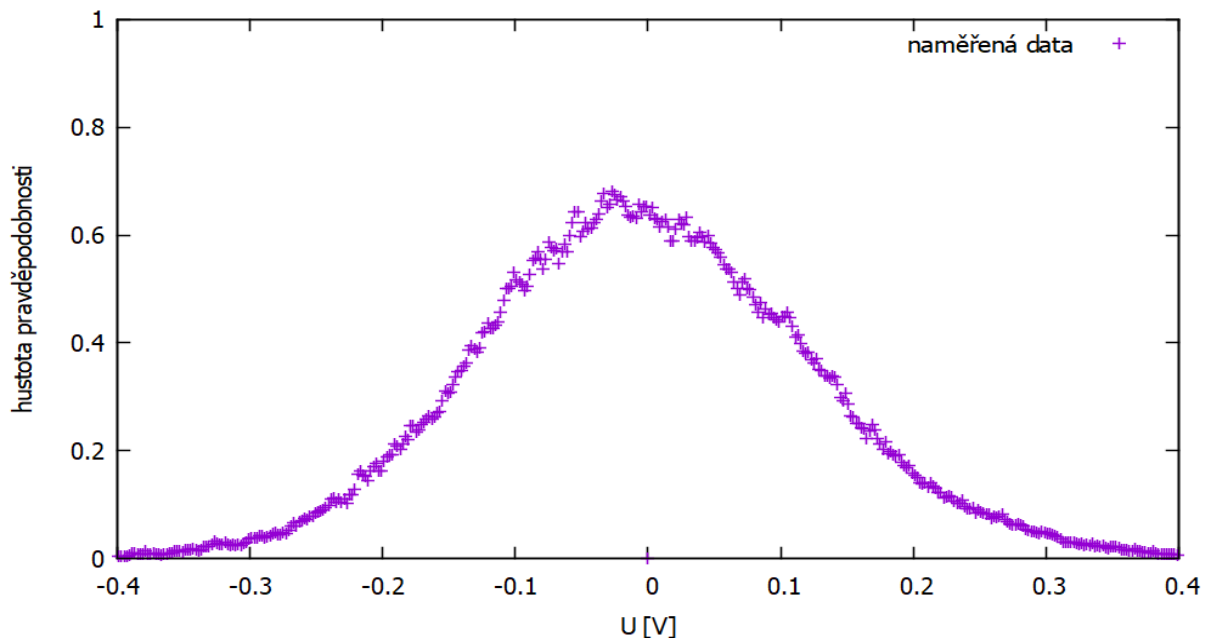
Pro určení dynamických vlastností RTD byl převeden signál z časové oblasti do oblasti frekvenční, resp. byla určena spektrální výkonová hustota signálu. Získaná spektrální výkonová hustota je vyobrazena v Graf 7. Pro převod z časové domény do domény frekvenční (pomocí Fourierovy transformace) byl použit software NI LabView.



Graf 7: Spektrální výkonová hustota RTD

8.2. Vyhodnocení

Aby bylo možné použít metodu šumové analýzy k určení časové konstanty, je nejdříve nutné ověřit, že hustota pravděpodobnosti tepelného šumu má normální (Gaussovský) charakter. Tato podmínka, jak ukazuje Graf 8, je splněna.



Graf 8: Hustota pravděpodobnosti tepelného šumu (histogram)

Pomocí teoretického modelu odvozeného v kapitole 6 a ze získané spektrální výkonové hustoty RTD je možné určit dynamické vlastnosti RTD. Vztah (5.26) říká, že naměřená spektrální výkonová hustota je popsána vztahem

$$PSD_Y = \textit{konstanta} |G|^2 ,$$

kde

PSD_Y -výstupní signál (získaná spektrální výkonová hustota),
 $|G|$ - velikost (magnituda) přenosové funkce.

Nyní je zřejmé pomocí které funkční závislosti je potřeba proložit získaná experimentální data. Opět byla využita funkce charakterizující systém 2. řádu. To znamená, že byly vyhodnoceny dvě modální časové konstanty. Tento přístup je v praxi nejčastěji využíván. Velikost přenosové funkce charakterizující systém 2. řádu je možné odvodit ze vztahu (5.28)

$$|G| = \left(\frac{1}{(\omega^2\tau_1^2 + 1)(\omega^2\tau_2^2 + 1)} \right)^{\frac{1}{2}} .$$

Experimentální data byla tedy proložena následující funkční závislostí

$$PSD_Y = \left(\frac{A}{(\omega^2\tau_1^2 + 1)(\omega^2\tau_2^2 + 1)} \right) ,$$

kde

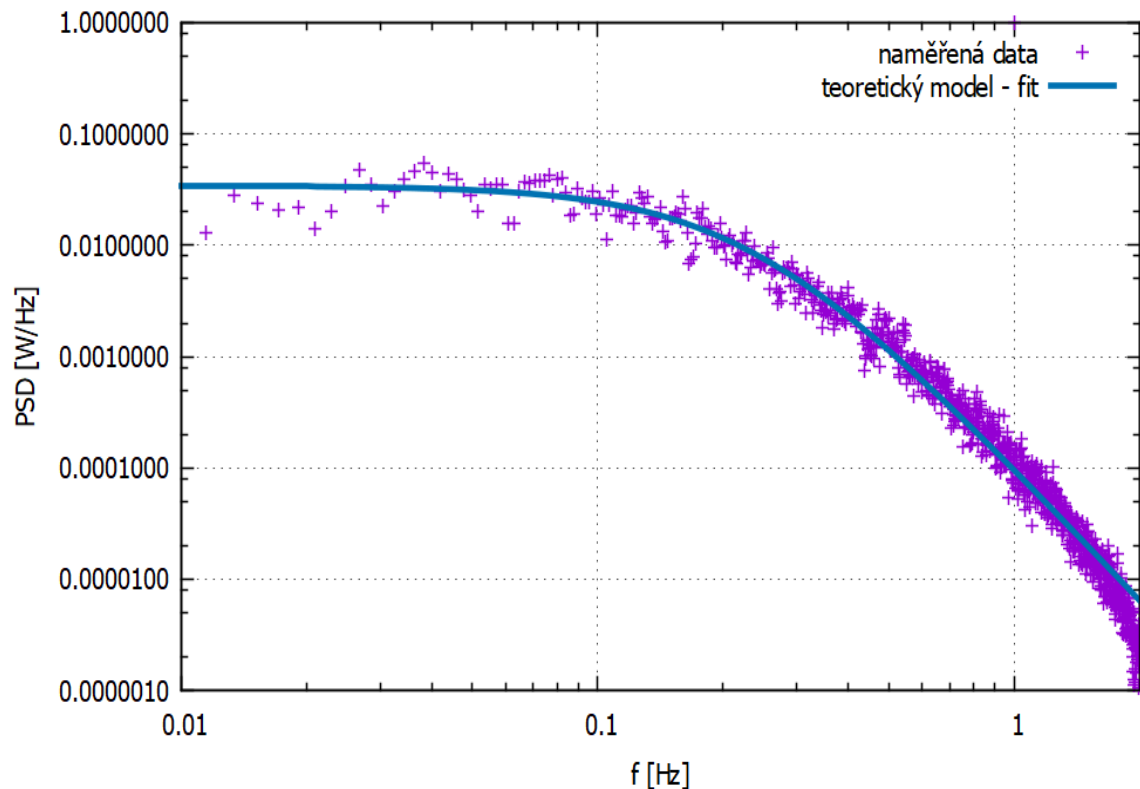
A - konstanta,

τ_1, τ_2 - modální časové konstanty [s],

$\omega = 2\pi f$ - úhlová frekvence [s^{-1}].

Fit funkce charakterizující 1. řád nekorespondoval přesně s naměřenými daty. Pokud by byl použit fit funkce charakterizující 3. a vyšší řád, bylo by obtížné vypočítat výslednou časovou konstantu z modálních časových konstant. Funkce charakterizující 2. řád proložila experimentální data velmi dobře (s nejmenší asymptotickou standardní chybou).

Fit spektrální výkonové hustoty (PSD) funkcí danou teoretickým modelem je zobrazen v Graf 3.



Graf 9: Fit PSD

Ze získané funkce byly zjištěny modální časové konstanty τ_1 a τ_2 , jejichž hodnoty jsou shrnuty v Tab. 4.

Tab. 4: Modální časové konstanty – šumová analýza

τ_1	τ_2
1,03 s	0,26 s

Z modálních časových konstant τ_1 a τ_2 byla výsledná časová konstanta τ_ζ stanovena dvěma metodami. Za prvé bylo využito vztahu (6.24), který byl použit již při testu ponořením

$$\tau_\zeta = \tau_1 \left[1 - \ln \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \right] .$$

Výsledná hodnota časové konstanty byla $\tau_\zeta = 1,34$ s.

Aby byl ověřen předchozí výsledek, byla výsledná časová konstanta vyhodnocena také tak, že se velikost přenosové funkce $|G|$ položila rovna $\frac{\sqrt{2}}{2}$. Tedy

$$\frac{\sqrt{2}}{2} = \left(\frac{1}{(\omega_0^2 \tau_1^2 + 1)(\omega_0^2 \tau_2^2 + 1)} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Po algebraické úpravě tohoto vztahu je vidět, že se jedná o řešení kvadratické rovnice

$$a^2 \omega_0 + b \omega_0 + c = 0,$$

kde

$$a = \tau_1^2 \tau_2^2,$$

$$b = \tau_1^2 + \tau_2^2,$$

$$c = -1.$$

Řešením kvadratické rovnice je mezní úhlová frekvence ω_0 . Pro mezní úhlovou frekvenci klesne výkon přenosu na polovinu.

Výsledná časová konstanta je rovna dle vztahu (6.29)

$$\tau_{\xi} = \frac{1}{\omega_0},$$

kde

ω_0 - mezní úhlová frekvence [s^{-1}].

Hodnota časové konstanty získaná pomocí šumové analýzy byla vyhodnocena jako $\tau_{\xi} = 1,11$ s. Zpracování dat, fit a výpočet časové konstanty byl proveden pomocí vytvořeného skriptu pro program Gnuplot.

9. Srovnání výsledků dle použitých metod

Tab. 5 shrnuje výsledné časové konstanty RTD určené pomocí testu ponořením a pomocí metody šumové analýzy. Obě metody vyhodnocují celkovou časovou konstantu RTD menší než 4 s, což je limit pro použití RTD na JE. Hodnota výsledné časové konstanty získaná metodou šumové analýzy vychází menší. To koresponduje s teorií, jelikož součinitel přestupu tepla v I.O. JE je mnohem větší než součinitel přestupu tepla vody (o rychlosti 1 m/s) o pokojové teplotě. Velikost časové konstanty je nepřímo-úměrná hodnotě součinitele přestupu tepla.

Tab. 5: Porovnání výsledných časových konstant

	τ_{ζ}
Test ponořením	2,29 s
Test ponořením (Strejcova metoda)	2,38 s
Šumová analýza (metoda 1)	1,34 s
Šumová analýza (metoda 2)	1,11 s

10. Závěr

Diplomová práce pojednává o měření dynamických charakteristik odporového teploměru (RTD). Odporové teploměry na jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory mají široké využití. Jednou z nejdůležitějších aplikací RTD je měření teplot na jednotlivých (horkých i studených) smyčkách primárního okruhu. Teploměry jsou v primárním okruhu uloženy v ochranných jímkách. Nejvíce používaný je čtyřvodičový platinový odporový teploměr pro jeho téměř lineární vazbu mezi elektrickým odporem a teplotou v potřebném rozsahu teplot a také proto, že kompenzuje nepříznivé jevy, které ovlivňují přesnost měření. Výstupní signály ze smyčkových RTD vstupují do řídicích a bezpečnostních systémů jaderné elektrárny, a proto musí být splněn požadavek na jejich rychlou odezvu. Dle provozních technických požadavků musí smyčkové RTD měřit s přesností nejméně 0,1 % a časová konstanta musí být menší než 4 s.

Měření teploty je spojené s tepelnou setrvačností teploměru a dynamické vlastnosti se určují v přechodovém stavu, což je stav, kdy se výstupní veličina ještě neustálila. Důležitou charakteristikou dynamických vlastností teploměrů je jejich časová konstanta. Velikost časové je funkcí několika fyzikálních veličin (koeficient prostupu tepla, měrná tepelná kapacita a hustota snímače ...). V průběhu provozu dochází k tzv. stárnutí RTD, jenž zhoršuje jeho dynamické vlastnosti.

Dynamické charakteristiky smyčkových RTD se v dnešní době ověřují před prvním použitím teploměru v jaderné elektrárně a dále je nutné jeho periodické ověřování. Existuje několik typů metod pro určení časové konstanty odporových teploměrů. Metoda LCSR test ponořením spočívá v měření a vyhodnocení přechodové charakteristiky RTD. Další metodou je šumová analýza využívající tepelných fluktuací chladiva primárního okruhu. Šumová analýza společně s metodou LCSR jsou vykonávány za provozu JE, tudíž odráží provozní podmínky RTD. Není tak potřeba čekat na pravidelné odstávky.

V rámci diplomové práce byly ověřeny dvěma metodami dynamické charakteristiky předem vybraného RTD. Nejdříve byl v laboratořích ÚJV proveden test ponořením. Z naměřené přechodové charakteristiky pomocí měřicího softwaru NI LabView byla dle teoretického modelu stanovena časová konstanta RTD, jejíž hodnota byla 2,29 s. Výsledek splňuje požadavky na časovou konstantu RTD.

Po testu ponořením byl RTD využit k měření teploty v horké smyčce primárního okruhu JE Temelín. Následně byly vyhodnoceny jeho dynamické vlastnosti pomocí metody šumové analýzy. Z naměřených tepelných fluktuací byla určena spektrální výkonová hustota, z níž lze (za jistých podmínek) vyhodnotit časovou konstantu RTD. Výsledná hodnota časové konstanty byla 1,11 s. Velikost časové konstanty získaná metodou šumové analýzy by dle teorie měla být menší než časová konstanta získaná testem ponořením. Tento požadavek byl splněn.

Do budoucna by bylo výhodné obě metody ověřit tak, že by bylo vykonáno více měření různých RTD. Výsledné časové konstanty by byly statisticky vyhodnoceny. Tím by byla zajištěna správnost výsledku (především pro šumovou analýzu, kde dynamické vlastnosti RTD nejsou přímo viditelné z naměřených hodnot). Bohužel po dobu vyhotovování této práce byl k dispozici pouze jeden RTD.

11. Bibliografie

- [1] **HASHEMIAN, H. M.** *Measurement of dynamic temperatures and Pressures in Nuclear Power Plants*. [University of Western] Ontario>, 2011.
- [2] **BLÁHA, V.** *Měření v jaderné energetice*. ZČU Plzeň : Investice do rozvoje a vzdělávání, 2011.
- [3] **HASHEMIAN, H. M.** *New Technology for Remote Testing of Response Time of Installed Thermocouples, Volume I-Background and General Details*. Knoxville : autor neznámý, 1992.
- [4] **HASHEMIAN, H. M.** *MONITORING AND MEASURING I&C PERFORMANCE IN NUCLEAR POWER PLANTS*. Knoxville : autor neznámý, 2014.
- [5] **ŠŤASTNÝ J., BOUČEK S., A KOLEKTIV.** *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [6] **KLEMSA, J.** *Regulace a automatizace energetických centrál* . [Západočeská univerzita v Plzni] Plzeň : autor neznámý, 2018.
- [7] **HASHEMIAN H. M., JIANG J.** *Nuclear Power Plant Temperature Instrumentation*. 2009.
- [8] **KREIDL, M.** *Měření teploty : senzory a měřící obvody*. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 80-7300-145-4.
- [9] **STŘEDA, J.** *Dynamické vlastnosti čidel kontaktních teploměrů : Z hlediska potřeb řídicí techniky*. PRAHA : autor neznámý, 1964.
- [10] **HEJZLAR, R.** *Sdílení tepla*. Praha : ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, 1993. 80-01-01011-2.
- [11] **TŮMA, F.** *Teorie řízení*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2009. 978-80-7043-819-0.
- [12] **HYNIOVÁ, K.** *Základy řízení systémů : přednášky*. Praha : České vysoké učení technické, 2012. 978-80-01-05065-1.
- [13] **KUBÍK S., KOTEK Z., ŠALAMON M.** *Teorie regulace*. Praha : SNTL, 1974.
- [14] **HASHEMIAN, H. M.** *Response Time and Drift Testing*. [ISA Paper] Knoxville : 37th International Instrumentation Symposium, 1991. 913–926.
- [15] **UPADHYAYA, B.** *In Situ Response Time of Platinum Resistance Thermometer*. Palo Alto : Electric Power Research Institute EPRI NP-834, 1978.

- [16] **TŮMA, F.** *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha : Sdělovací technika, 1997. 80-901936-1-7.
- [17] **PERILLO S. R. P., GONCALVES I. M. P., SANTOS R. C., TING D. K. S.** *TIME RESPONSE MEASUREMENT OF TEMPERATURE AND PRESSURE SENSORS OF ANGRA-I NUCLEAR POWER PLANT USING NOISE ANALYSIS TECHNIQUE*. São Paulo, Brasil : Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP.
- [18] **HASHEMIAN, H. M.** *New Technology for Remote Testing o Response Time of Installed Thermocouples*. místo neznámé : Arnold Engineering Development Center, 1992. AEDC-TR-91-26.
- [19] **HASHEMIAN, H. M.** *ON-LINE MEASUREMENTS OF RESPONSE TIME OF TEMPERATURE AND PRESSURE SENSORS IN PWRs*. Knoxville : Analysis and Measurement Services Corporation.
- [20] **GARAN, M.** *Experimentální identifikace metodou profesora Strejce*. [Technická univerzita v Liberci] Liberec : Katedra výrobních systémů a automatizace, 2009.
- [21] **LAMARSH, J. R., BARRATA, A. J.** *Introduction to nuclear engineering*. New Jersey : Prentice - Hall, 2001.