

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚŘENÍ MECHANICKÝCH A ELEKTRICKÝCH VELIČIN NA DVOJKOVECH

MEASUREMENT OF MECHANICAL AND ELECTRICAL QUANTITIES OF BIMETALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Kocian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Štěpán Kocian

ID: 195358

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měření mechanických a elektrických veličin na dvojkovech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip funkce bimetalu v elektrických přístrojích a potřebné materiálové vlastnosti.
2. Pro zadaný tvar bimetalu vytvořte matematický popis.
3. Připravte potřebné experimenty pro stanovení vybraných charakteristik.
4. Získané výsledky přehledně zpracujte a analyzujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] Thermostatic Bimetal Handbook, Kanthal AB, 2008
- [4] ČSN EN 60947-2 ed. 3 - Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 3.8.2020

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na bimetal. V teoretické části je nejdříve popsán princip fungování bimetalů, poté důležité parametry bimetalu včetně matematických popisů. Dále jsou zmíněné a matematicky popsány způsoby vyhřívání bimetalů. V poslední části teorie jsou pak popsány normy, které se vztahují k využití bimetalů v jističích s příslušnými smluvenými vypínacími proudy. V praktické části jsou zpracována měření na bimetalu. Měření se zabývala volným průhybem a silou vytvářenou bimetalem v závislosti na oteplení. Z naměřených dat byly zpracované charakteristiky a popsány závislosti vlastností pro bimetal. Poslední kapitola byla věnována vytvoření laboratorní práce.

Klíčová slova

Bimetal; Teplotní roztažnost; Vyhřívání; Přetížení; Nadproudová ochrana; Časově závislá spoušť; Měření

Abstract

This bachelor thesis focuses on bimetals. In the theoretical part is described the principle of operation of bimetals, then important parameters of bimetal, including mathematical equations. Furthermore, methods of heating bimetals are mentioned and mathematically described. The last part in theory concentrates on the standards related to the use of bimetals as circuit breakers and the corresponding agreed breaking currents. The practical part deals with measurements on bimetal. This is measurement of free deflection and the force generated by the bimetal depending on the temperature change. From the measured data, the characteristics and the dependences of the properties for bimetal were processed. The last chapter was devoted to the creation of laboratory work.

Keywords

Bimetal; Thermal expansion; Heating; Overload; Overcurrent protection; Time Delay Switch; Measurement

Bibliografická citace:

KOČIAN, Štěpán. *Měření mechanických a elektrických veličin na dvojkovech*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123492>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření mechanických a elektrických veličin na dvojkovech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **3. srpna 2020**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **3. srpna 2020**

.....

podpis autora

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	9
Seznam obrázků.....	12
Seznam tabulek.....	14
1. Úvod.....	15
2. Použití bimetalu.....	16
2.1 Bimetalový termostat.....	16
2.2 Kompenzační bimetal.....	16
2.3 Bimetalový teploměr.....	16
2.4 Spínací přístroje.....	17
2.5 Další využití.....	17
3. Vlastnosti bimetalu.....	18
3.1 Princip funkce bimetalu.....	18
3.2 Materiály a výroba bimetalu.....	20
3.3 Parametry bimetalu.....	22
3.3.1 Měrná tepelná křivost.....	22
3.3.2 Měrný tepelný ohyb.....	24
3.3.3 Mez linearity.....	26
3.4 Vyhřívání bimetalu.....	27
3.4.1 Přímé vyhřívání.....	27
3.4.2 Nepřímé vyhřívání.....	29
4. Požadavky norem – průmyslové jističe nízkého napětí.....	32
4.1 Zapínání.....	32
4.2 Vypínání.....	32
4.3 Vypínání nadproudových spouští v podmínkách přetížení.....	32
4.3.1 Funkce bez prodlevy nebo s nezávislou prodlevou.....	32
4.3.2 Funkce se závislou prodlevou.....	32
4.4 Zkoušky spouští v podmínkách přetížení.....	33
4.4.1 Spouště bez prodlevy nebo nezávislé časové spouště.....	33
4.4.2 Závislé časové spouště.....	34
5. Požadavky norem – domovní jističe.....	35
5.1 Požadavky na konstrukci a činnost.....	35

5.2	Zkoušky.....	38
5.2.1	Zkouška vypínací charakteristiky	38
5.2.2	Zkouška charakteristiky čas-proud	38
6.	Měření volného průhybu bimetalu	39
6.1	Postup měření.....	42
6.2	Výsledky měření	43
6.3	Zhodnocení měření.....	45
7.	Měření síly vytvářené bimetalem.....	46
7.1	Postup měření.....	49
7.2	Výsledky měření	50
7.3	Zhodnocení měření.....	52
8.	Laboratorní práce – měření na bimetalu	53
	Závěr	54
	Literatura.....	55
	Seznam příloh	57

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

ČSN	...	Česká norma
Cu	...	Měď
EN	...	Evropská norma
FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
IEC	...	International Electrotechnical Commission
Fe	...	Železo
nn	...	nízké napětí
Mn	...	Mangan
Mo	...	Molybden
Ni	...	Nikl
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
Zn	...	Zinek

Symboly:

a	...	měrný tepelný ohyb	$[K^{-1}]$
A	...	průhyb bimetalu	$[m]$
A_M	...	změřený průhyb bimetalu	$[mm]$
b	...	šířka bimetalu	$[m]$
c	...	měrné objemové teplo materiálu bimetalu	$[W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
c_1	...	měrné objemové teplo vinutí	$[W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
c_2	...	měrné objemové teplo bimetalu	$[W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
E_1	...	modul pružnosti aktivní vrstvy	$[Pa]$
E_2	...	modul pružnosti pasivní vrstvy	$[Pa]$
F_1, F_2	...	síly působící při ohybu bimetalu	$[N]$
h	...	výška bimetalu	$[m]$
I	...	proud	$[A]$
I_n	...	jmenovitý proud	$[A]$
k	...	měrná tepelná křivost	$[K^{-1}]$
L	...	délka bimetalu při teplotě okolí	$[m]$

ΔL	...	změna délky bimetalu	[m]
L_1	...	délka aktivní vrstvy	[m]
L_2	...	délka pasivní vrstvy	[m]
ΔL_1	...	změna délky aktivní vrstvy	[m]
ΔL_2	...	změna délky pasivní vrstvy	[m]
P	...	povrch bimetalu	[m ²]
P_1	...	povrch vinutí	[m ²]
P_2	...	povrch bimetalu (nepřímý ohřev)	[m ²]
Q_3	...	tepelný tok vstupující do izolace	[J]
R	...	elektrický odpor	[Ω]
R_0	...	poloměr při teplotě okolí T_0	[m]
R_T	...	poloměr při teplotě T	[m]
s	...	celková tloušťka bimetalu	[m]
s_1	...	tloušťka aktivní vrstvy	[m]
s_2	...	tloušťka pasivní vrstvy	[m]
S_3	...	plocha izolace	[m ²]
t	...	čas	[s]
t_k	...	určitá doba, která způsobí oteplení θ_k	[s]
T	...	teplota	[°C]
T_0	...	počáteční teplota (teplota okolí)	[°C]
ΔT	...	změna teploty	[°C]
U	...	napětí	[V]
V	...	objem bimetalu	[m ³]
V_1	...	objem vinutí	[m ³]
V_2	...	objem bimetalu	[m ³]
α	...	činitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
α_0	...	součinitel přestupu tepla	[W · m ² · K ⁻¹]
α_{01}	...	součinitel přestupu tepla vinutí	[W · m ² · K ⁻¹]
α_{02}	...	součinitel přestupu tepla bimetalu	[W · m ² · K ⁻¹]
α_1	...	činitel teplotní roztažnosti aktivní vrstvy	[K ⁻¹]
α_2	...	činitel teplotní roztažnosti pasivní vrstvy	[K ⁻¹]
δ_3	...	tloušťka izolace	[m]

θ	...	oteplení bimetalu oproti okolí	[K]
θ_1	...	oteplení vinutí	[K]
θ_{1m}	...	ustálené oteplení vinutí	[K]
θ_2	...	oteplení bimetalu	[K]
θ_{2m}	...	ustálené oteplení bimetalu	[K]
θ_{avg}	...	průměrné oteplení z měření	[K]
θ_k	...	určité oteplení, které je způsobeno za čas t_k	[K]
θ_m	...	ustálené oteplení	[K]
θ_p	...	pracovní oteplení	[K]
λ	...	vlnová délka	[m]
λ_3	...	tepelná vodivost izolace	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
τ	...	tepelná časová konstanta	[K ⁻¹]
τ_1	...	tepelná časová konstanta vinutí	[K ⁻¹]
τ_2	...	tepelná časová konstanta bimetalu	[K ⁻¹]

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Konstrukce jističe [6]</i>	17
<i>Obr. 2: Princip bimetalu</i>	18
<i>Obr. 3: Příklady vrstev bimetalu [4]</i>	21
<i>Obr. 4: Měrná tepelná křivost [3]</i>	23
<i>Obr. 5: Měrný tepelný ohyb [3]</i>	25
<i>Obr. 6: Mez linearity [3]</i>	26
<i>Obr. 7 Schéma měření volného průhybu</i>	40
<i>Obr. 8 Zapojení jističe (bimetalu) s laserovým snímačem polohy terčíku</i>	41
<i>Obr. 9 Graf závislosti průhybu na průměrném oteplení (s vyznačenou mezí linearity)</i>	43
<i>Obr. 10 Graf závislosti průhybu a proudu na čase</i>	44
<i>Obr. 11 Graf závislosti teploty částí bimetalu a proudu na čase</i>	44
<i>Obr. 12 Schéma zapojení jističe se silovým čidlem</i>	46
<i>Obr. 13 Zapojení jističe (bimetalu) se silovým čidlem</i>	48
<i>Obr. 15 Graf závislosti síly na průměrném oteplení (s přímkou linearity)</i>	50
<i>Obr. 14 Graf závislosti síly na průměrném oteplení - bodový (včetně ochlazování)</i>	50
<i>Obr. 16 Graf závislosti teploty a proudu na čase</i>	51
<i>Obr. 17 Graf závislosti síly a proudu na čase</i>	51
<i>Obr. 18 Měřicí pracoviště pro laboratorní práci</i>	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vypínací charakteristiky časově závislých spouští pro průmyslové jističe [7].....	33
Tabulka 2: Hodnoty oteplení [8].....	35
Tabulka 3: Pracovní charakteristika čas-proud [8].....	37

1. ÚVOD

Nadproudy neboli proudy, které jsou vyšší než jmenovitý proud I_n , mají nepříznivé vlivy na zařízení, jež napájejí, jelikož se projevují nežádoucími tepelnými a elektrodynamickými účinky. Tyto účinky mohou zapříčinit poškození nebo zkrácení životnosti přístroje dle velikosti a doby působení nadproudu. V konečném důsledku pak mohou způsobit ekonomické škody nebo ohrožení životů. Z tohoto důvodu je výhodné využívat jisticích zařízení (jističe, pojistky), které jsou schopny přerušit obvod, a tím tak chránit přístroj.

Jističe musí fungovat tak, aby byly schopné tolerovat časově omezené nadproudy, jež vzniknou při normálním provozu (např. zapínání). Nadproudy se dělí na přetížení a zkrat, přičemž přetížení převyšuje jmenovitý proud I_n méně, avšak zkrat může dosahovat až několika-násobku jmenovitého proudu I_n . Z toho důvodu mají jističe zabudované dvě spouště – tepelnou a zkratovou. Zkratová spoušť chrání před nebezpečnými tepelnými a elektro-dynamickými účinky zkratového proudu, přičemž využívá elektromagnet. Správná funkce spočívá ve schopnosti bezpečného a dostatečně rychlého vypnutí (či omezení) zkratového proudu. Tepelná spoušť chrání před nedovoleným přetížením. V důsledku čehož pak dochází ke zkrácení životnosti a v některých případech i havárií. Spoušť při správném fungování nedovolí zařízení překročit povolenou teplotu tím, že ho odpojí od sítě dříve, než k překročení dojde. V tepelných spouštích se nejčastěji používají bimetal (dvojkovy), a právě touto konkrétní částí zařízení se semestrální práce zabývá. Konkrétní požadavky pro správné fungování jsou pak popsány dle norem ČSN EN. Část z nich je obsažena i v této práci. [1][9]

Práce popisuje použití, princip funkce v elektrických zařízeních a potřebné materiálové vlastnosti bimetalu. Dále obsahuje matematické popisy těchto vlastností i způsobů vyhřívání bimetalu. Součástí je i kapitola věnovaná normám týkajících se jističů nn, kde bimetal pracuje jakožto tepelná spoušť. Práce zahrnuje i úvodní měření volného průhybu bimetalu, které se zakládá právě na zkouškách norem.

2. POUŽITÍ BIMETALU

Bimetal využívá ke svému fungování teplotní roztažnosti, tudíž má široké použití v různých přístrojích či zařízeních.

2.1 Bimetalový termostat

Velmi užitečné jsou dvojkovy využívané jakožto termostaty pro automatickou kontrolu obvodu z hlediska potřebné teploty. Např. elektrické ohřívače, klimatizace, elektrické trouby, ledničky, elektrické žehličky. Pokud bimetal pracuje jako termostat, tak jeden jeho konec v přístroji je připojen ke zdroji a druhý je volný. Při normální teplotě je obvod spojen, pokud se však teplota zvýší nad povolenou hranici, tak bimetal obvod rozpojí. Následný pokles teploty vyústí v opětovné spojení obvodu.

Bimetal může být použit ve formě pásku nebo také ve formě spirály, která má v důsledku větší délky i větší citlivost. [5]

2.2 Kompenzační bimetal

Mechanické systémy přístrojů či zařízení mohou být velice závislá a citlivá vůči teplotě. Tato citlivost může vyústit v chybu ve správném fungování nejčastěji nepřesností. Díky využití bimetalu je možné chybu vykompenzovat a snížit na minimum. Např. ampérmetr s kompenzací okolní teploty nebo mechanismus hodinek. [5]

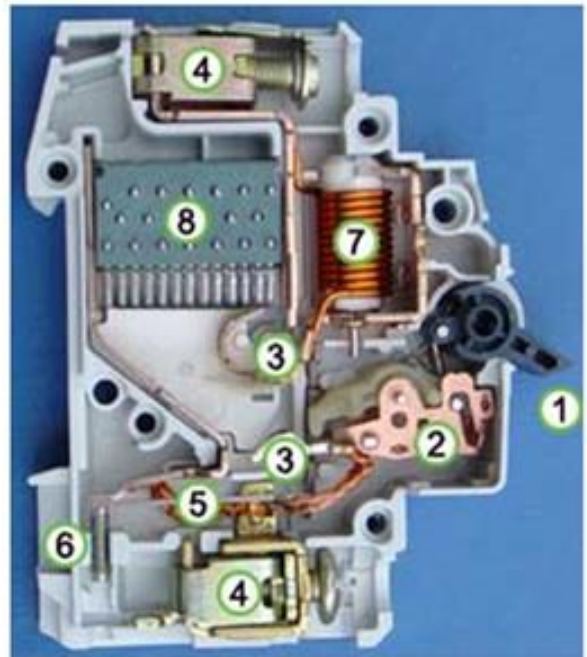
2.3 Bimetalový teploměr

Bimetal může být přímo využit i v teploměrech, přičemž se zde používá výhradně ve formě spirály. Jeden jeho konec je připojen k plášti přístroje a druhý k ukazateli teploty. Při zahřívání se spirála pohybuje, což zapříčiní výchylku ukazatele na stupnici. Stupnice je nastavená na určitý teplotní rozsah. [5]

2.4 Spínací přístroje

Často přítomen je bimetal ve spínacích přístrojích. Jeho úloha je zde rozpoznávat a chránit před nadproudy zaviněné přetížením. Proud procházející obvodem přímo či nepřímo ohřívá bimetal. V důsledku ohřátí se bimetal ohýbá a rozpojuje obvod, tím tak obvod chrání a reguluje. Např. jističe, relé, ochrana před přetížením motoru či regulátory napětí a proudu. [1]

1. ovládací páčka
2. aretační mechanismus
3. kontakty
4. přívodní šroubová svorka
5. bimetalový člen pro vybavení přetížením
6. regulační prvek nastavení citlivosti
7. elektromagnetická spoušť pro vybavení zkratem
8. zhášecí komora



Obr. 1: Konstrukce jističe [6]

2.5 Další využití

Mezi další zajímavé využití bimetalu se řadí třeba separátory kondenzátu nebo bimetalová pojistka před nežádoucím únikem plynu. [3]

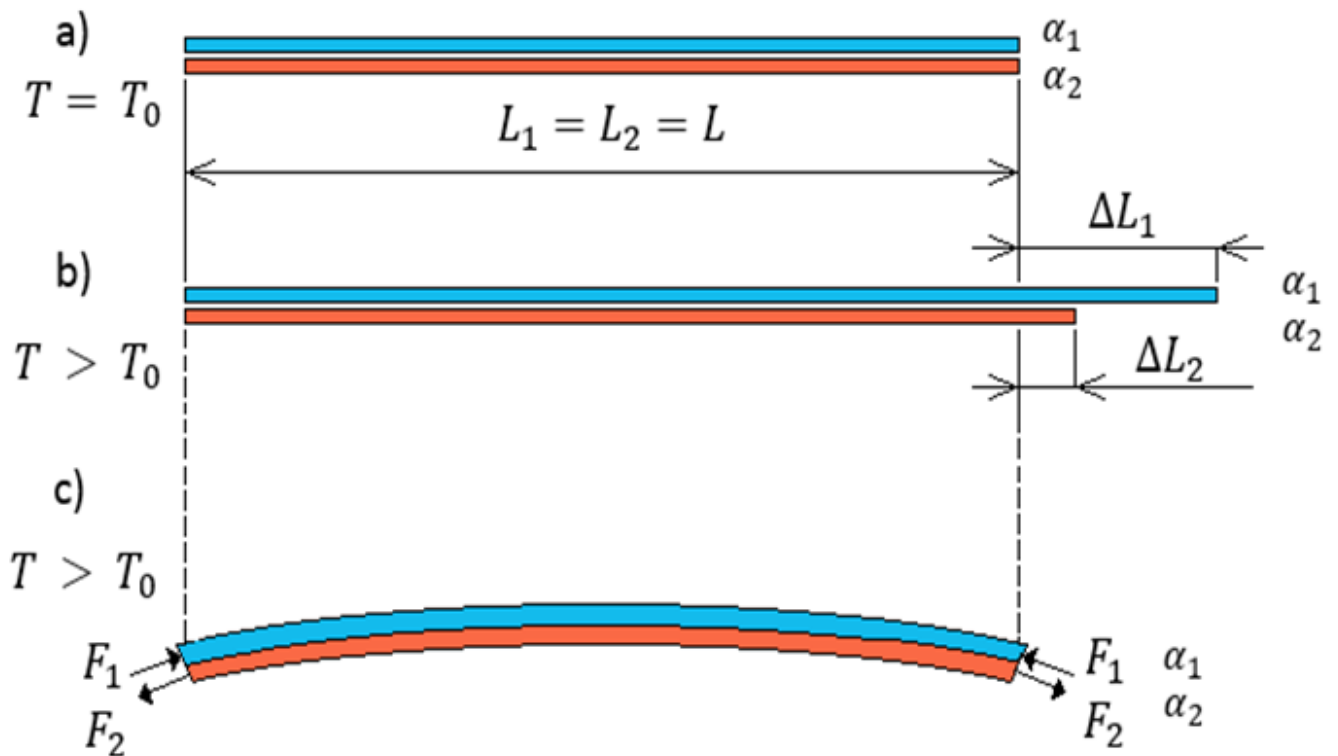
3. VLASTNOSTI BIMETALU

Dvojkov neboli bimetal je prvkem obsaženým ve spínacích přístrojích. Jeho úloha je zde rozpoznávat a chránit před nadproudy zaviněné přetížením. [1]

3.1 Princip funkce bimetalu

Bimetal se nejčastěji skládá ze dvou vrstev kovů spojených k sobě celou svojí plochou, tvarovaných do obdélníkového pásku či pásku ve tvaru U. Přičemž každá vrstva má jinou hodnotu činitele teplotní roztažnosti (α_1, α_2), a platí že $\alpha_1 > \alpha_2$. Vrstva (α_1) s vyšším činitelem teplotní roztažnosti se nazývá aktivní, vrstva (α_2) s nižším činitelem teplotní roztažnosti se poté nazývá pasivní.

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot (T - T_0) = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3.1)$$



Obr. 2: Princip bimetalu

Platí zde předpoklad, že při teplotě okolí T_0 (nejčastěji 20 °C) mají obě vrstvy jednoho pásku stejnou délku $L_1 = L_2 = L$ (viz Obr. 2a). Za ohřívání (v elektrických přístrojích Joulovým teplem) na určitou teplotu T (přičemž $T > T_0$) se obě vrstvy díky rozdílnému činiteli teplotní roztažnosti (α_1, α_2) prodlouží o jinou délku ΔL (pro případ oddělených vrstev viz Obr. 2b).

V případě, že má bimetal volnou pozici a za předpokladu rovnoměrného oteplení vznikají namáhání (síly) F_1, F_2 . Ze vzorce (3.1) lze zjistit, že prodloužení aktivní vrstvy bude větší než u vrstvy pasivní $\Delta L_1 > \Delta L_2$. Jelikož jsou však obě vrstvy pevně spojené, tak dochází k deformaci pásku. Pasivní (kratší) vrstva je namáhána tahovou silou (F_2) způsobenou rozpínáním aktivní (delší) vrstvy, a naopak aktivní je namáhána tlakovou silou (F_1) způsobenou bráněním pasivní (kratší) vrstvy v rozpínání (viz Obr. 2c).

Z výše uvedeného vyplývá, že se deformace projeví ohybem bimetalového pásku do tvaru oblouku. Součet všech deformací je však větší než deformace způsobené pouze prodloužením jednotlivých vrstev. Bimetal se totiž deformuje nejen ve směru délky, ale i šířky. Toto křížové zakřivení snižuje délkové zakřivení. Vysvětluje se tím také, proč ohyb bimetalu závisí i na šířce.

Na této závislosti (změna teploty způsobující změnu deformace) je postavené využití bimetalu. Tudíž se používá jako automatický prvek v zařízeních, které jsou teplotně závislé. Tím může být např. termostat či teploměr, ale nejčastěji je využit v jisticích zařízeních jako prvek spouště nebo relé proti nadproudům. Když totiž proti směru jeho deformace umístíme nějakou překážku, tak tím umožníme bimetalovému pásku konat práci, a tudíž fungovat jako spoušť. Přesněji překážka (např. západka volnoběžky) funguje jako síla opačná proti silám způsobující deformaci pásku, jakmile jsou deformační síly větší než protisíla západky – západka se posune (vybaví), bimetal tak vykoná práci, spínací přístroj se vypíná, a odpojuje tak konkrétní část obvodu od sítě.

Pásek může být ukotven pouze jedním koncem, v tomto případě pak vykonává práci druhý konec. Dvojkov může však být ukotven i z obou stran, zde pak koná práci jeho střední část. Tento případ se využívá, pokud je zapotřebí mžikového rozepnutí obvodu. [1] [2]

3.2 Materiály a výroba bimetalu

Jak již bylo vysvětleno v předchozí kapitole, tak pro správné fungování bimetalového pásku je zájem, aby činitelé teplotních roztažností (α_1, α_2) byly u vrstev dostatečně rozdílné. Jednotlivé vrstvy mají tedy rozdílné složení.

Pasivní vrstva (α_2) s požadavkem na nízký činitel teplotní roztažnosti je nejčastěji zhotovená ze slitin železo-niklu (Fe-Ni). Jedna z využívaných slitin s nejnižším činitelem teplotní roztažnosti je invar. Jeho činitel nepřesahuje hodnotu $3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ při teplotě do $200 \text{ }^\circ\text{C}$, poté $15 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ při $400 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž jeho složení Fe-Ni je 64/36 %. Obecně procento zastoupení niklu ve výsledných slitinách je přibližně do 40 %. Pokud roste výš, tak se zvyšuje i jeho činitel teplotní roztažnosti, a je tak pro pasivní vrstvu méně vhodný.

Naopak u aktivní vrstvy (α_1) je požadavek na vysoký činitel teplotní roztažnosti. Využívá se tedy slitin železa i neželezných kovů. Je možné použít i čisté železo, tento případ se však vyskytuje pouze málo, jelikož čisté železo má činitel pouze okolo $13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$, pokud se teplota pohybuje od $0 \text{ }^\circ\text{C}$ do $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzhledem k vlastnostem je výhodnější využít slitiny Fe-Ni-Mo nebo Fe-Ni-Mn. Poté slitiny neobsahující železo jako třeba mosaz (Cu-Zn), monel (Cu-Ni) nebo konstantan (Cu-Ni-Mn). Neželezné slitiny jsou nejčastěji na bázi mědi či niklu s drobnými přísadami jiných prvků. Také se vyznačují vysokým činitelem roztažnosti, vhodnými mechanickými vlastnostmi a menší elektrickým odporem oproti železným slitinám.

Z předchozích odstavců lze vidět, že činitel teplotní roztažnosti nezávisí pouze na materiálu, ale i na teplotě. Vlastnosti jednotlivých vrstev se s rostoucí teplotou zásadně mění, tudíž je možné využívat bimetal pouze v určitém teplotním rozmezí za účelem správné funkce. Maximální dovolená pracovní teplota závisí na složení všech vrstev pásku. Výrobci z pravidla udávají pracovní teplotu za pomoci křivky linearit – stejnoměrná citlivost prvku. Bimetaly použitelné do $200 \text{ }^\circ\text{C}$ se tedy určitě budou lišit od použitelných do $400 \text{ }^\circ\text{C}$, avšak při překročení této hranice už se bimetaly většinou nevyužívají. Změny vlastností jsou až příliš velké a nedovolují bezpečné používání.

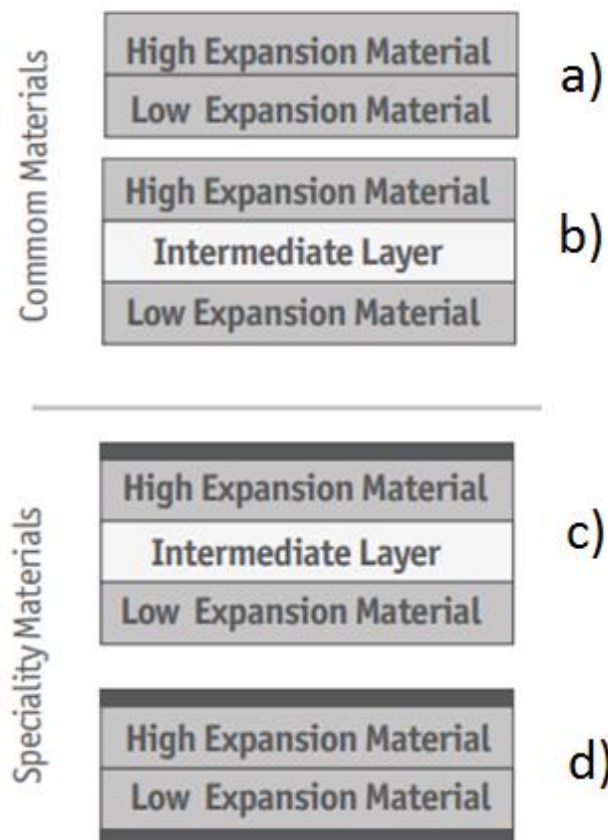
Z názvu dvojkov vyplývá, že by se pásek měl skládat ze dvou kovů (vrstev). V praxi se však využívá u bimetalů více vrstev za účelem zlepšení určitých požadovaných vlastností. Z obr. 3a je možné vidět běžný bimetál skládající se ze dvou vrstev, přičemž jedna má vysoký činitel teplotní roztažnosti a druhá nízký. Na dalším obrázku (Obr. 3b)

se už přidala prostřední vrstva, která je přidána za účelem změny odporových vlastností a zlepšení tepelného prostupu. Nejčastěji se využívá měď (Cu) nebo nikl (Ni).

Obr. 3c zobrazuje bimetal s ještě jednou vnější vrstvou mědi (Cu) pro vylepšení svařovacího procesu. Poslední obrázek (Obr. 3d) - bimetal je obohacen o dvě vnější vrstvy nerezové oceli pro zlepšení odolnosti vůči korozi.

Výroba bimetalu se v současnosti realizuje nejčastěji dvěma způsoby. Většina průmyslu využívá spojování bimetalu za studena. Toto je prováděno opakovaným válením vrstev, tak aby z nich byly odstraněny oxidy a ostatní nečistoty.

Druhá možnost je spojování za tepla, tato metoda využívá víc tepla a zároveň méně tlaku oproti studené metodě. Než se vrstvy spojí, tak materiál prochází redukující atmosférou, která odstraňuje oxidy a mikroskopické nečistoty. Spojování vrstev je zajištěno teplotou dosahující 70 až 80 % teploty kapalnění kovů. [1] [2] [4]



Obr. 3: Příklady vrstev bimetalu [4]

3.3 Parametry bimetalu

3.3.1 Měrná tepelná křivost

Měrná tepelná křivost je nejdůležitější vlastností bimetalu a je definována jako změna křivosti bimetalového pásku za jednotku teploty pro jednotku tloušťky. Bimetalový pásek o dvou vrstvách při vystavení tepleu změni své zakřivení podle vztahu:

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (1 + m)^2}{3 \cdot (1 + m)^2 \cdot (1 + m \cdot n) \cdot \left(m^2 + \frac{1}{m \cdot n}\right)} \cdot \frac{T - T_0}{s} \quad (3.2)$$

Kde:

R_T – poloměr při teplotě T [m]

R_0 – poloměr při teplotě okolí(počáteční) T_0 [m]

α_1 – činitel teplotní roztažnosti aktivní vrstvy [K^{-1}]

α_2 – činitel teplotní roztažnosti pasivní vrstvy [K^{-1}]

$m = \frac{s_1}{s_2}$ – s_1, s_2 jsou tloušťky jednotlivých vrstev [-, m, m]

$n = \frac{E_1}{E_2}$ – E_1, E_2 jsou moduly pružnosti jednotlivých vrstev [-, Pa, Pa]

Většinou jsou tloušťky obou vrstev stejné $s_1 = s_2$, tím pádem $m = 1$. Stejně to platí i u modulu pružnosti pro obě vrstvy $E_1 = E_2$, $n = 1$. Po dosazení do předchozí rovnice (3.2) se vztah změni:

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{2} \cdot \frac{T - T_0}{s} \quad (3.3)$$

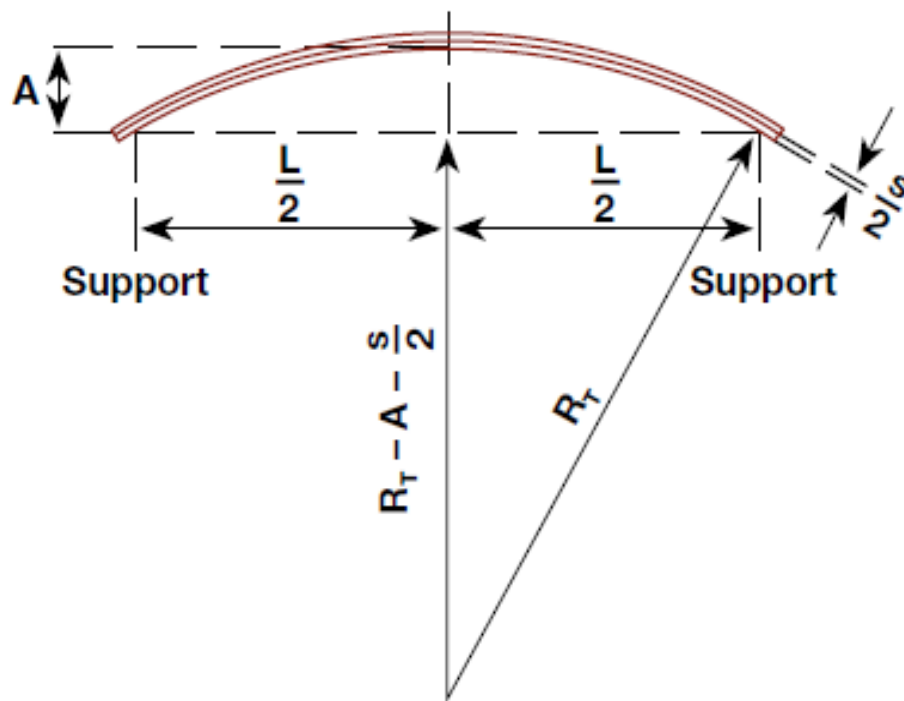
Konstanta $\frac{3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2)}{2}$ se nazývá měrná tepelná křivost a značí se k , přičemž její jednotka je [K^{-1}]. Pokud dosadíme do rovnice (3.3), tak získáme:

$$k = \frac{\left(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0}\right) \cdot s}{T - T_0} \quad (3.4)$$

[3]

Pokud je bimetal při T_0 rovný, poté je $R_0 = \infty$, přičemž můžeme rovnici (3.4) opět zjednodušit na:

$$k = \frac{1}{R_T} \cdot s \quad (\text{popř.}) \quad \frac{1}{R_T} = k \cdot \frac{T - T_0}{s} \quad (3.5)$$



Obr. 4: Měrná tepelná křivost [3]

Křivost se vypočítá za pomoci metody jednoduchého paprsku, z obr. č. 4 jsme schopni odvodit rovnici (Pythagorova věta):

$$(R_T)^2 = \left(R_T - A - \frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2$$

Po matematických úpravách dostaneme:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{8A}{L^2 + 4A^2 - 4A \cdot s} \quad (3.6)$$

(pozn. bimetalový pásek je podepřen v obou koncích, přičemž vzdálenost A je počítána od středu pásku, L je celková délka pásku a s celková tloušťka)

Předpokládáme rovný bimetal při T_0 , tudíž z rovnic 3.5 a 3.6 získáme:

$$k = \frac{s}{T - T_0} \cdot \frac{8A}{L^2 + 4A^2 - 4A \cdot s} \quad (3.7)$$

Většinou se ve jmenovateli $A \cdot s$ zanedbává, a pokud je A menší než 5 % z L , tak je možné zanedbat i $4A^2$. Rovnice se poté zjednoduší až na:

$$k = \frac{8A \cdot s}{(T - T_0) \cdot L^2} \quad (3.8)$$

[3]

3.3.2 Měrný tepelný ohyb

Měrný tepelný ohyb je veličina obdobná měrné tepelné křivosti. Měrný tepelný ohyb je v Evropě brán jako deformace přímého pásku upnutého na jednom konci, 1 mm tlustého a 100 mm dlouhého, pro teplotní rozdíl 1 °C v rozmezí linearity. Tato hodnota je o čtyři desetinná místa vyšší než hodnota uvedená v tabulce fyzikálních vlastností. Značí se a a jednotka je $[K^{-1}]$. [2]

Měrný tepelný ohyb se dá vypočítat přes měrnou tepelnou křivost přibližně podle vztahu:

$$a = \frac{k}{2} \quad (3.9)$$

Tento vztah však není úplně přesný, jelikož je ohyb ovlivněn vnějšími silami potlačujícími křivost v místě, kde je bimetalový pásek upevněn.

Pomocí nosníkové metody je možné si ohyb spočítat. Z Obr. 5 si odvodíme rovnici:

$$\left(R_T + \frac{S}{2}\right)^2 = \left(R_T + \frac{S}{2} - A\right)^2 + L^2$$

Po matematické úpravě:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{2A}{L^2 + A^2 - A \cdot s} \quad (3.10)$$

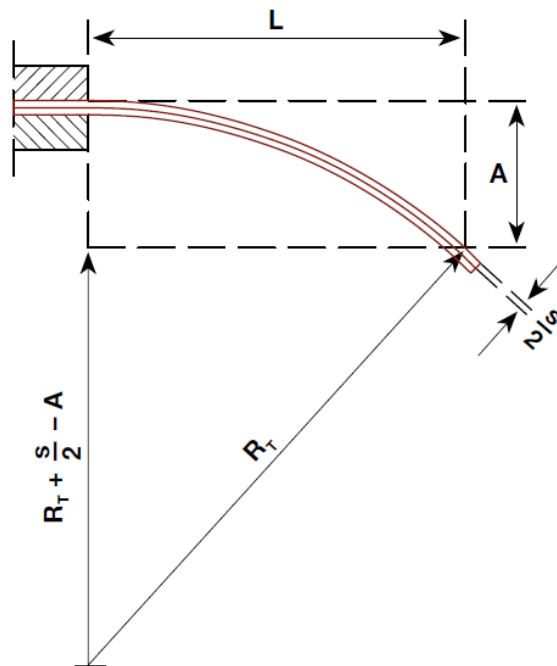
Z rovnic 3.9 a 3.10, poté získáme:

$$a = \frac{A \cdot s}{(T - T_0) \cdot (L^2 + A^2 - A \cdot s)} \quad (3.11)$$

Opět se jako u měrné tepelné křivosti většinou zanedbává ve jmenovateli $A \cdot s$, jestliže je A menší než 10 % z L , tak se může zanedbat i A^2 . Za daným podmíněk dostaneme vztah:

$$a = \frac{A \cdot s}{(T - T_0)^2 \cdot L^2} \quad (3.12)$$

[3]



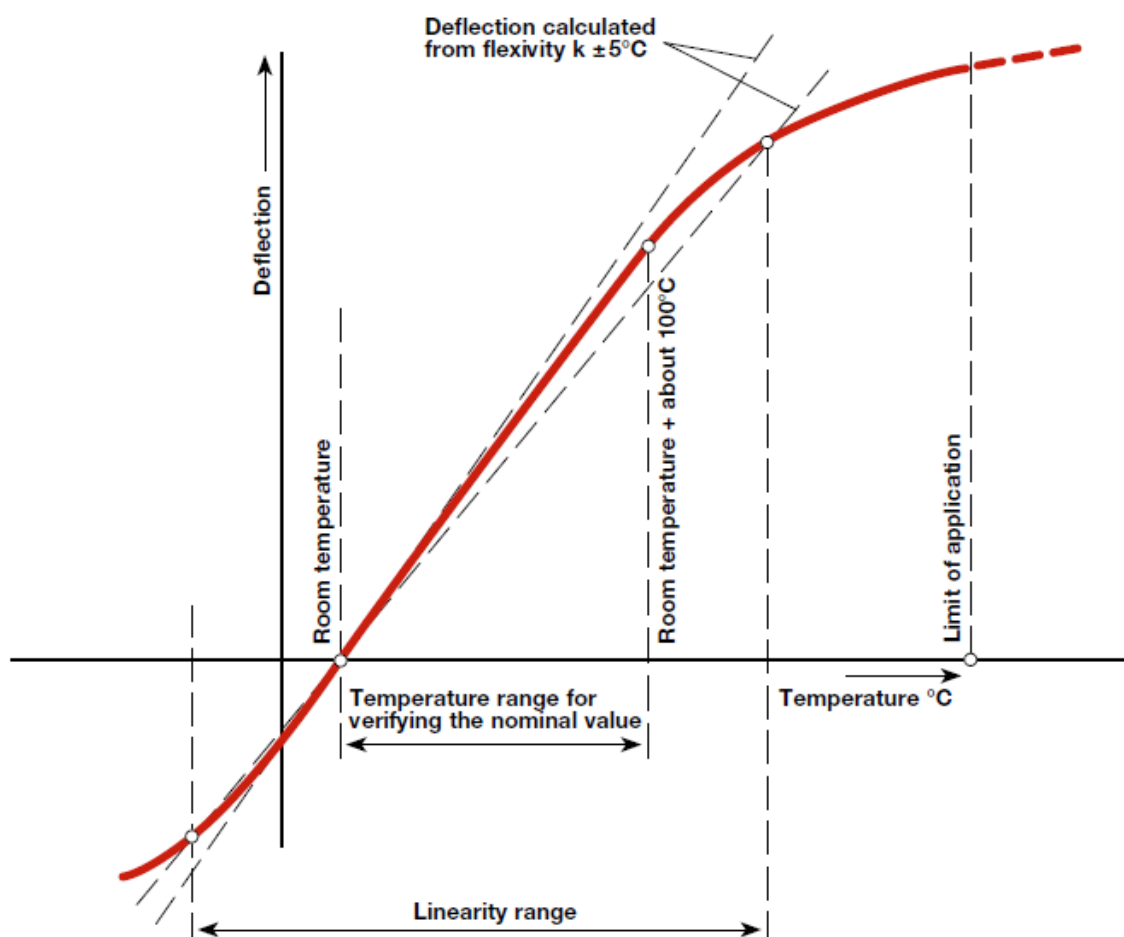
Obr. 5: Měrný tepelný ohyb [3]

3.3.3 Mez linearity

Mez linearity vyjadřuje rozsah teplot, kde jsou vlastnosti bimetalu ideální, protože jejich charakteristika je zde v podstatě přímočará. [1]

Přesněji poté mez linearity označuje teplotní rozsah, ve kterém se tepelná výchylka nemění o více než 5 % od výchylky vypočtené z jmenovité hodnoty měrné tepelné křivosti/ohybu. Tato hodnota je uvedena jako pomocná, jelikož bimetal lze použít i mimo tento rozsah. V takových případech se odkazuje na okamžitou hodnotu měrného tepelného ohybu. Jmenovitá hodnota označuje hodnotu v rozsahu teplot od 20 po 100 °C. [2]

V mnoha případech není nutné limitovat použití pouze na mez linearity. Přesně jako ukazuje graf (Obr. č. 6) možnost použití přesahuje mez linearity a pokračuje dál. [3]



Obr. 6: Mez linearity [3]

3.4 Vyhřívání bimetalu

Vyhřívání bimetalu může být provedeno přímo nebo nepřímo. Přímé vyhřívání je způsobeno přímo procházejícím proudem. Nepřímé vyhřívání je provedeno například s pomocí topného vinutí. [1]

3.4.1 Přímé vyhřívání

Přímý ohřev je způsoben procházejícím proudem I přímo bimetaldovým páskem. Lze tedy použít využit rovnici tepelné rovnováhy (vznik a odvádění tepla):

$$R \cdot I^2 \cdot dt = c \cdot V \cdot d\theta + \alpha_0 \cdot P \cdot \theta \cdot dt \quad (3.13)$$

Kde:

R – odpor bimetaldového pásku [Ω]

I – proud procházející bimetaldem [A]

c – měrné objemové teplo materiálu bimetalu [$W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]

V – objem bimetalu [m^3]

θ – oteplení bimetalu proti okolí [K]

α_0 – součinitel přestupu tepla (měrná chladivost povrchu) [$W \cdot m^2 \cdot K^{-1}$]

P – povrch bimetalu [m^2]

Přičemž člen ($R \cdot I^2 dt$) vyjadřuje teplo vytvořené průchodem proudem bimetaldem v čase t , další člen ($c \cdot V \cdot d\theta$) má význam části tepla spotřebované na zvýšení teploty bimetalu a poslední člen ($\alpha_0 \cdot P \cdot \theta dt$) popisuje ztráty tepla povrchem bimetalu s okolím.

Pro výpočet oteplení bimetalu, jimž proudem I rozhoduje především tepelná časová konstanta τ [K^{-1}] o objemu $V = L \cdot b \cdot h$ a povrchu $P = 2 \cdot (b + h) \cdot L$.

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot P} = \frac{c \cdot b \cdot h}{2\alpha_0 \cdot (b + h)} \quad (3.14)$$

Kde:

L – délka bimetalu [m]

h – výška bimetalu [m]

b – šířka bimetalu [m]

[1]

V případě, že čas trvání nadproudu nI (n -násobek jmenovitého proudu) nepřesahuje $0,2\tau$ ($t \leq 0,2\tau$), tak je možné zanedbat ztráty tepla povrchem bimetalu. A vypočítat oteplení dle vzorce:

$$\theta_k = \frac{R \cdot (nI)^2}{c \cdot V} \cdot t_k \quad (3.15)$$

Oteplení materiálu bimetalu je většinou dané, tudíž se počítá doba t_k za působení nadproudu nI , nebo také rozměry pásku při určité době t_k a nadproudu nI .

Pokud je však čas trvání nadproud vyšší je už nutné ztráty tepla povrchem bimetalu započítat. Vztah pro okamžité oteplení (oteplení v čase) bimetalu tedy bude:

$$\theta = \theta_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3.16)$$

Kde:

$\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ – rovnice exponenciály

θ_m – ustálené oteplení, přičemž jí lze vypočítat dle:

$$\theta_m = \frac{R \cdot (nI)^2}{\alpha_0 \cdot P} = \frac{\rho \cdot (nI)^2}{2\alpha_0 \cdot b \cdot h \cdot (b + h)} \quad (3.17)$$

Ze vztahu 3.16 lze zjistit, že při $t = \tau$ bude hodnota okamžitá hodnota oteplení

$$\theta = 0,632\theta_m.$$

Charakteristika bimetalu je závislost času dosažení pracovní teploty při průtoku proudu nI , ale je zjednodušená, neboť počítá s konstantní měrnou chladivostí povrchu α_0 . Ta se nicméně mění s oteplením. [1]

3.4.2 Nepřímé vyhřívání

Při průchodu proudů 6 A a méně by bylo teplo vytvořené průchodem pouze malé, a tak by nestačilo k ohřevu bimetalu na pracovní teplotu. Popřípadě natolik velké, že by takovou teplotu bimetal nevydržel. V takových případech je nutné pásek vytápět nepřímo. Toho lze dosáhnout pomocí odporového vinutí s izolační podložkou ovinutého okolo pásku. Teplo vytvořené průchodem proudu odporovým vinutím se tedy spotřebovává na ohřev vinutí, ztráty tepla s okolím a ohřev bimetalového pásku. Je tedy nutné rovnici 3.13 upravit:

$$R \cdot I^2 \cdot dt = c_1 \cdot V_1 \cdot d\theta + \alpha_{01} \cdot P_1 \cdot \theta_1 \cdot dt + Q_3 \cdot dt \quad (3.18)$$

Do izolační podložky (umístěné mezi odporové vinutí a bimetal) vstupuje z jedné strany tepelný tok Q_3 vycházející z vinutí, přičemž na opačné straně vystupuje do pásku. Na povrchu izolační podložky jsou rozdílná oteplení θ_1, θ_2 . Pro tato oteplení musí platit $\theta_1 > \theta_2$, aby mohl vzniknout teplotní spád, a v důsledku toho tok Q_3 :

$$Q_3 = \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot S_3 \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (3.19)$$

Kde:

S_3 – plocha izolační podložky [m^2]

δ_3 – tloušťka izolační podložky [m]

λ_3 – tepelná vodivost izolační podložky [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\frac{\delta_3}{\lambda_3}$ – význam koeficientu přestupu tepla z vinutí do pásku

Teplo, jež se dostane do pásku se z části spotřebuje na oteplení a část je ztrátou s okolím dle:

$$Q_3 \cdot dt = c_2 \cdot V_2 \cdot d\theta + \alpha_{02} \cdot P_2 \cdot \theta_2 \quad (3.20)$$

[1]

Vyřešením diferenciálních rovnic 3.18 a 3.20 je možné získat oteplení přímo odporového vinutí nebo jenom bimetalu. Vzorce jsou složitější, tudíž je vhodné zavést zjednodušení:

$$a_1 = c_1 \cdot V_1$$

$$a_2 = c_2 \cdot V_2$$

$$b_1 = \alpha_{01} \cdot P_1$$

$$b_2 = \alpha_{02} \cdot P_2$$

$$A = \frac{a_1 \cdot b_3 + a_1 \cdot b_2 + a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_3}{a_1 \cdot a_2}$$

$$B = \frac{b_1 \cdot b_2 + b_1 \cdot b_3 + b_2 \cdot b_3}{a_1 \cdot a_2}$$

Výpočet časových konstant topného vinutí τ_1 a bimetálového pásku τ_2 :

$$\tau_1 = \frac{A}{2B} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4B}{A^2}} \right) \quad (3.21)$$

$$\tau_2 = \frac{A}{2B} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4B}{A^2}} \right) \quad (3.22)$$

Výpočet ustáleného oteplení:

$$\theta_{1m} = \frac{b_2 + b_3}{b_1 \cdot b_2 + b_1 \cdot b_3 + b_2 \cdot b_3} \cdot R \cdot I^2 \quad (3.23)$$

$$\theta_{2m} = \frac{b_3}{b_1 \cdot b_2 + b_1 \cdot b_3 + b_2 \cdot b_3} \cdot R \cdot I^2 \quad (3.24)$$

[1]

Z předchozích vzorců (3.21; 3.22; 3.23; 3.24) je možné vyjádřit θ_1 a θ_2 :

$$\theta_1 = \theta_{1m} \cdot \left[1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{\tau \cdot (b_2 + b_3)} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \left(1 - \frac{a_2}{\tau_2 \cdot (b_2 + b_3)} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right] \quad (3.25)$$

$$\theta_2 = \theta_{2m} \cdot \left[1 + \left(\frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) - \left(\frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \right] \quad (3.26)$$

Pokud platí $t > 5\tau_1$, tak je možné člen $\left(\frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$ v 3.26 zanedbat.

Pokud bereme $\theta_p = \theta_2$, tak je možné úsek charakteristiky stanovit vzorcem:

$$t = \tau_2 \cdot \left(\ln \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} - \frac{\theta_{2m}}{\theta_{2m} - \theta_p} \right) \quad (3.27)$$

[1]

4. POŽADAVKY NOREM – PRŮMYSLOVÉ JISTIČE NÍZKÉHO NAPĚTÍ

4.1 Zapínání

Pro bezpečné zapnutí jističe do zapínacího proudu, který koresponduje s jeho jmenovitými zapínacími schopnostmi je nutné, aby rychlost a síla spínání byly stejné jako za průběhu zkoušky pro ověření zkratové zapínací schopnosti. [7]

4.2 Vypínání

Jističe, jež se vypínají samočinně, musí mít nezávislý vybavovací mechanismus (viz 2.4.23 IEC 60947-1:2007). Za předpokladu, že dohoda mezi výrobcem nestanovuje jinak, tak je nutné, aby jističe měli nasřádanou energii pro vypínání před ukončením zapínání. [7]

4.3 Vypínání nadproudových spouští v podmínkách přetížení

Vypínání u nadproudových spouští za podmínek přetížení může dojít za funkce bez prodlevy nebo nezávislou prodlevou či funkce se závislou prodlevou. Pro každou funkci platí jiné podmínky. [7]

4.3.1 Funkce bez prodlevy nebo s nezávislou prodlevou

Vybavení spouště je nutné mít nastavené s přesností $\pm 10\%$ hodnoty vypínacího proudu proudového nastavení při všech hodnotách proudového nastavení spouště v podmínkách přetížení. [7]

4.3.2 Funkce se závislou prodlevou

Tabulka č. 1 ukazuje smluvené hodnoty pro funkci vypínání nadproudové spouště při přetížení podle normy ČSN EN 60947-2 pro průmyslové jističe nízkého napětí. [7]

Tabulka 1: Vypínací charakteristiky časově závislých spouští pro průmyslové jističe [7]

Smluvený vypínací proud	Smluvený nevypínací proud	Jmenovitý proud jističe	Smluvená doba
1,30násobek proudového nastavení	1,05násobek proudového nastavení	$I_n \leq 63 \text{ A}$	1 h
		$I_n > 63 \text{ A}$	2 h

Smluvený nevypínací proud je proud, za jehož průtoku nesmí jistič vybavit dříve než po uplynutí smluvené doby. Platí za studeného stavu, tj. s jističem o teplotě okolí.

Naopak smluvený vypínací proud je proud, při jehož průtoku musí dojít k vybavení jističe, než uplyne smluvená doba. [7]

4.4 Zkoušky spouští v podmínkách přetížení

4.4.1 Spouště bez prodlevy nebo nezávislé časové spouště

Správné fungování spouští bez prodlevy nebo časově nezávislých spouští je nutné ověřit na 90 % a 110% přetížení spouště. Dále je nutné pro správné provedení zkoušky nemít u zkušebního střídavého proudu žádnou asymetrii. Pro zkoušku stejnosměrného proudu nesmí mít zkušební proud při zapnutí žádný překmit a časová konstanta musí být menší než 10 ms. U vícepólových spouští se ověřuje na všech pólech současně.

Pro přetížení spouště 90 % proudového nastavení nesmí spoušť vybavit. Proud je udržován po dobu 0,2 s u spouští bez prodlevy. U nezávislých časových spouští poté po dobu dvojnásobku časové prodlevy stanovené výrobcem.

Pro přetížení spouště 110 % proudového nastavení musí spoušť vybavit. K vybavení musí dojít do 0,2 u spouští bez prodlevy. U nezávislých časových spouští poté do doby dvojnásobku časové prodlevy stanovené výrobcem. [7]

4.4.2 Závislé časové spouště

Parametry závislých časových spouští se zkoušejí dle požadavků z tabulky č.1. Pro jističe s nulovým pólem platí také tabulka č.1, avšak využívá se 1.20násobek zkušební proud. Zkouška se provádí při referenční teplotě okolního vzduchu (za studeného stavu). Pokud je teplota vzduchu jiná, tak nutné provést korekci dle závislosti teplota/proud poskytnuté výrobcem.

Pro tepelně-magnetické spouště, které mají být dle výrobce nezávislé na teplotě okolního vzduchu, je nutné ověřovat za pomoci dvou měření. První při $30\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a druhé při $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ (popř. $40\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$), navíc je nutné, aby spoušť byla napájena ve všech fázových pólech. [7]

5. POŽADAVKY NOREM – DOMOVNÍ JISTIČE

5.1 Požadavky na konstrukci a činnost

Jističe je nutné navrhnout a vykonstruovat tak, aby při běžném provozu a manipulaci byla jejich činnost spolehlivá a bezpečná pro uživatele či okolí. Tato vlastnost je kontrolována pomocí zkoušek. [8]

Tabulka 2: Hodnoty oteplení [8]

Části ^{a,b}	Oteplení [K]
Svorky pro vnější spoje	60
Vnější části, kde je možnost dotyku při ručním ovládní jističe (zahrnuje i ovládací prvky izolačních materiálů a kovových prostředků pro spojení izolovaných ovládacích prvků několika pólů)	40
Vnější kovové části ovládacích prvků	25
Jiné vnější části včetně čelní plochy jističe, která je v kontaktu s montážním povrchem	60
Poznámky:	
a) Pro kontakty není určena žádná hodnota, protože konstrukce většiny jističů jsou takové, že přímé měření teploty není možné provádět bez rizika změny či posunu částí ovlivňujících opakovatelnost zkoušek. Za dostatečnou je považována zkouška trvajících 28 dní, přičemž nepřímo kontroluje chování kontaktů se zaměřením na nadměrné přehřívání v provozu.	
b) Pro neuvedené části nejsou hodnoty specifikovány, nicméně musí být vyloučeno poškození či zhoršení činnosti sousedních částí z izolačních materiálů.	
c) U jističů odnímatelného typu svorky základové desky, na níž jsou instalovány	

- **Meze oteplení**

Oteplení částí jističe nesmí překročit mezní hodnoty z tabulky 2, přičemž jsou hodnoty měřené za podmínek uvedených v kapitole 4.2.

- **Teplota okolního vzduchu**

Meze oteplení uvedené v tabulce č.1 pouze za předpokladu, zachování teploty okolního vzduchu podle podmínek: Horní mez teploty udává, že teplota okolního vzduchu nesmí překročit +40 °C, přičemž průměr nepřekročí +35 °C za časový úsek 24 h. Dolní mez je stanovena na -5 °C. Jističe používané mimo tyto meze je nutné speciálně navrhnout a používat dle informací z katalogu výrobce.

- **Nadmořská výška**

Instalace jističe většinou nepřesahuje nadmořskou výšku 2000 m. Pokud je jistič instalován ve vyšších nadmořských výškách je nutné počítat se snížením dielektrické pevnosti a chladících účinků vzduchu. Jističe používané ve vyšších nadmořských výškách musí být opět speciálně navrženy a využívány dle informací z katalogu či dle dohody s výrobcem.

- **Atmosférické podmínky**

Relativní vlhkost nepřesahuje 50 % při maximální teplotě +40 °C. Při nižších teplotách mohou být přípustní i vyšší relativní vlhkost (např. 90 % při 20 °C).

- **Nepřerušovanost provozu**

Jističe musí pracovat i při dlouhodobém provozu spolehlivě.

- **Automatická činnost**

Vypínací charakteristiky musí být vytvořeny tak, aby zajišťovaly ochranu obvodu, aniž by zapůsobily předčasně. Tabulka 3 definuje vypínací charakteristiky, přičemž se vztahuje k jističi v souladu s referenčními podmínkami, který pracuje za kalibrační referenční teploty 30 °C s tolerancí +5 °C.

Zkoušku lze i provést při jiné teplotě, ale výsledky se vztahují k 30 °C při využití informací poskytnutých výrobcem. Změna zkušebního proudu z tabulky nesmí překročit 1,2 % na K změny kalibrační teploty. Pokud mají jističe označenou jinou kalibrační teplotu, tak se zkouší za té uvedené. [8]

Tabulka 3: Pracovní charakteristika čas-proud [8]

Zkouška	Zkušební proud	Počáteční stav	Meze vypínací nebo nevypínací doby	Požadované výsledky	Poznámky
a	$1,13 I_n$	Studený (a)	$t \leq 1 h$ (pro $I_n \leq 63 A$) $t \leq 2 h$ (pro $I_n > 63 A$)	Žádné vypnutí	
b	$1,45 I_n$	Okamžitě po zkoušce (a)	$t < 1 h$ (pro $I_n \leq 63 A$) $t < 2 h$ (pro $I_n > 63 A$)	Vypnutí	Proud se plynule zvyšoval během 5 s
c	$2,55 I_n$	Studený (a)	$1 s < t < 60 s$ (pro $I_n \leq 32 A$) $1 s < t < 120 s$ (pro $I_n > 32 A$)	Vypnutí	
Poznámky:					
a) Studený – bez předchozího zatěžování při referenční teplotě					

• **Vliv jednopólového zatížení vícepólových jističů na vypínací charakteristiku**

Vícepólové jističe (s více jištěnými póly), které jsou zatěžovány pouze u jednoho pólu, musí vybavit při:

- 1,1x smluvený vypínací proud u dvojpólových jističů (oba póly jsou jištěné)
- 1,2x smluvený vypínací proud u trojpólových a čtyřpólových jističů

Studený stav se předpokládá jako výchozí pozice. Smluvená doba vybavení vychází z tabulky č.3 (zkouška b).

• **Vliv teploty okolního vzduchu na vypínací charakteristiku**

Pokud se teplota okolního vzduchu liší od referenční teploty, jež má rozmezí od -5 °C do $+40\text{ °C}$, tak není přijatelné, aby jakýmkoliv způsobem ovlivnila vypínací charakteristiku daného jističe. [8]

5.2 Zkoušky

5.2.1 Zkouška vypínací charakteristiky

Zkouška je provedena dle podmínek Automatické činnosti (viz 5.1). Pokud je zkouška prováděna v klidném ovzduší. Pokud je testování uskutečněno v uzavřeném prostředí, tak je nutná dostatečná velikost, aby nebyl ovlivněn průběh zkoušky. [8]

5.2.2 Zkouška charakteristiky čas-proud

Proud rovný $1,13 I_n$ (nevypínací proud) prochází po dobu uvedenou v tab. č.3, musí procházet všemi póly a je vycházeno ze studeného stavu (teplota okolí). Za daných podmínek nesmí jistič vybavit.

Následně se postupně zvyšuje proud na $1,45 I_n$ za 5 s, poté musí jistič vybavit dle doby uvedené v tabulce č.3.

Pro další část se opět vychází ze studeného stavu, proud prochází všemi póly a má hodnotu $2,55 I_n$. Za daných podmínek nesmí být vypínací doba kratší než 1 s, a zároveň delší než 60 při jmenovitém proudu do 32 A včetně či delší než 120 s pro proudy vyšší než 32 A. [8]

6. MĚŘENÍ VOLNÉHO PRŮHYBU BIMETALU

Cílem úvodního měření bylo měření na bimetalu (tepelné spoušti) jističe Siemens. Z jističe byla odstraněna západka, aby při průhybu nedošlo k vybavení. Zároveň byl zablokován vybavovací mechanismus, aby nedošlo k vybavení automaticky. Dále pak oddělení plastové části naspodu jističe. Tudíž se mohl měřit volný průhyb tím, že se na konec (špice) bimetalu zavěsil terčík, jehož polohu je pak možné dobře sledovat. Měřilo se pouze na prostředním pólu jističe. Za účelem snímání teploty byly také na bimetal (uvnitř jističe) připevněny 3 termočlánky na patu, střed a špici. Pro snížení úniku tepla byl vytvořený otvor přelepený páskou (viz Obr.8).

Při měření volného průhybu bimetalu byly změřeny následující charakteristiky:

1. závislost průhybu a proudu na čase
2. závislost teploty a proudu na čase
3. závislost průhybu na oteplení

Při měření byly použité přístroje:

Zdroj proudu

Jistič Siemens (upraven)

Laboratorní zdroj Supply 230 V

Laserový snímač vzdálenosti optoNCDT 2300; $\lambda=670\text{nm}$

Univerzální měřicí ústředna AHLBORN ALMEMO 5690-2

Rogowského cívka

Transformátor 129255 JDV

C-Box Analog

Měřicí modul AHLBORN ALMEMO ZA 9900-AB3; DC napětí $\pm 20\text{ V}$, přesnost $\pm 0,1\%$ z rozsahu ± 2 digity, rozlišení $0,01\text{ V}$, vzorkování 1 kHz [10]

Měřicí modul AHLBORN ALMEMO ZA 9903-AB3; rozsah AC $\pm 13\text{ V}$, špičková hodnota $\pm 20\text{ V}$, $\pm 0,1\%$ z rozsahu ± 2 digity, rozlišení $0,01\text{ V}$, vzorkování 1 kHz [11]

4x Termočlánek K

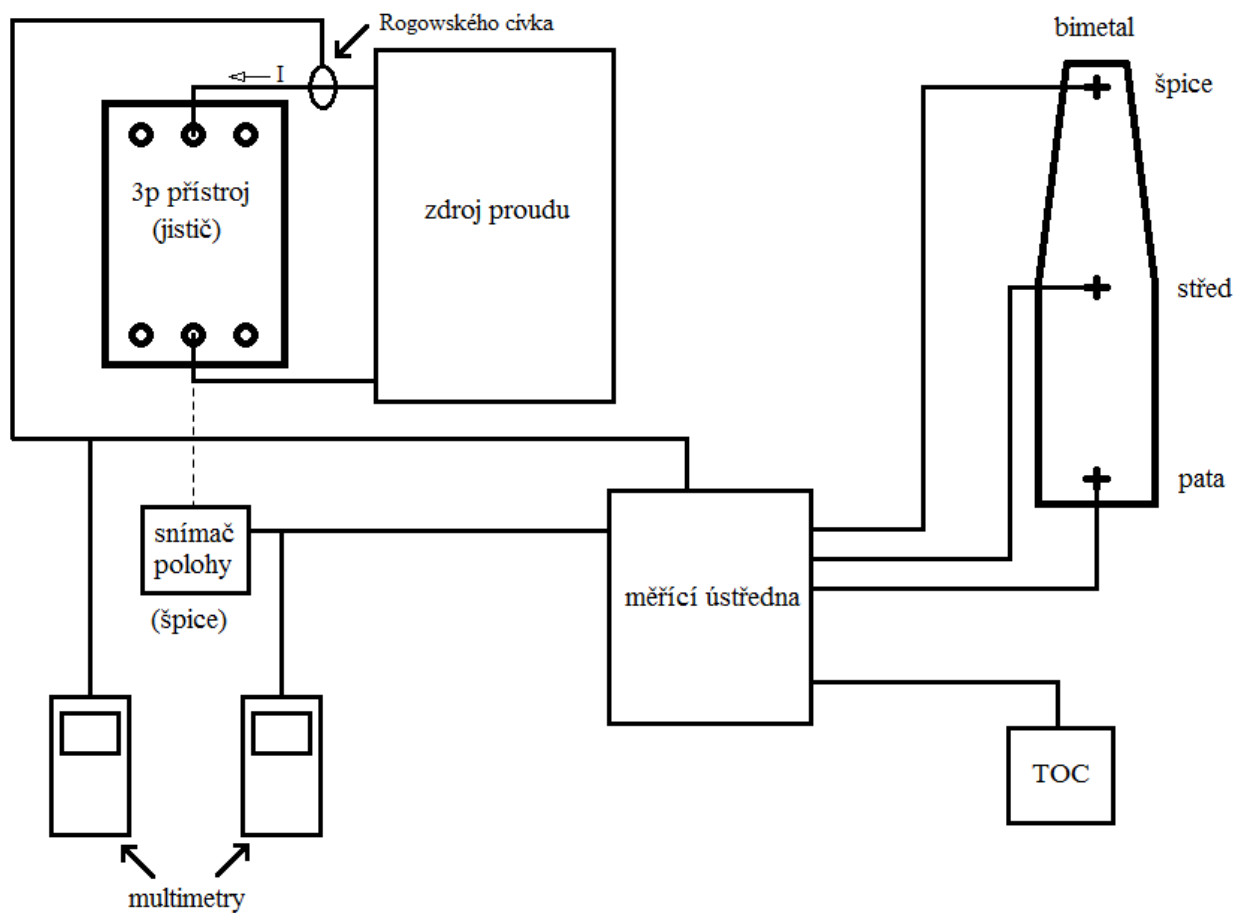
2x Konektor AHLBORN ALMEMO ZA9900-AB Digi R3 E4

4x Konektor AHLBORN ALMEMO ZA9000-FS3; DC napětí $\pm 2,6\text{ V}$

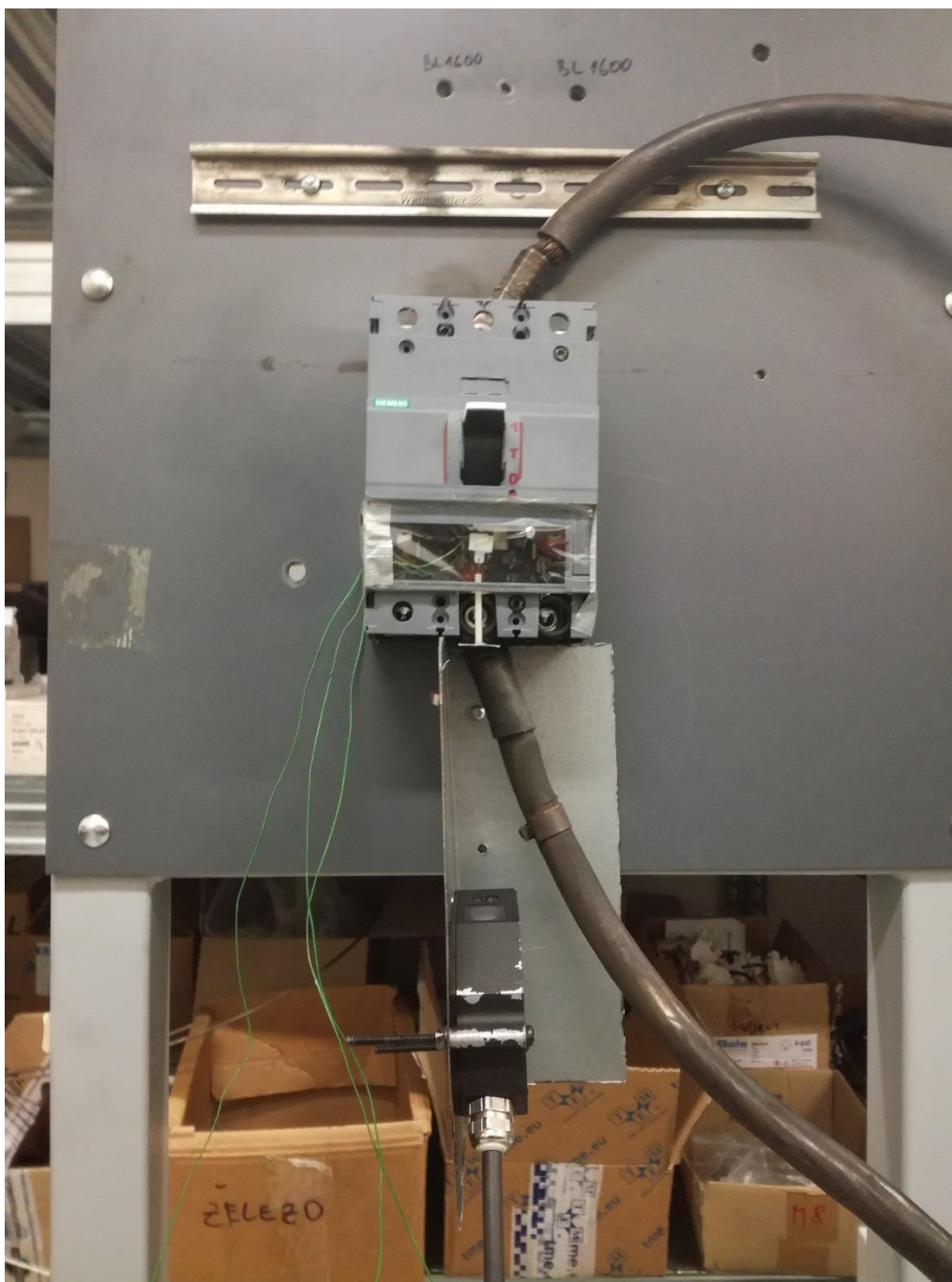
2x Multimetr Hexagon 340A; pro 50 Hz přesnost:

AC napětí $\pm(0,5 + 3 \text{ digity})$ v celém rozsahu

DC napětí $\pm(0,12 + 2 \text{ digity})$ pro rozsah 50mV, $\pm(0,06 + 2 \text{ digity})$ pro 500mV, $\pm(0,08 + 2 \text{ digity})$ pro rozsah 5V a vyšší [12]



Obr. 7 Schéma měření volného průhybu



Obr. 8 Zapojení jističe (bimetalu) s laserovým snímačem polohy terčičku

6.1 Postup měření

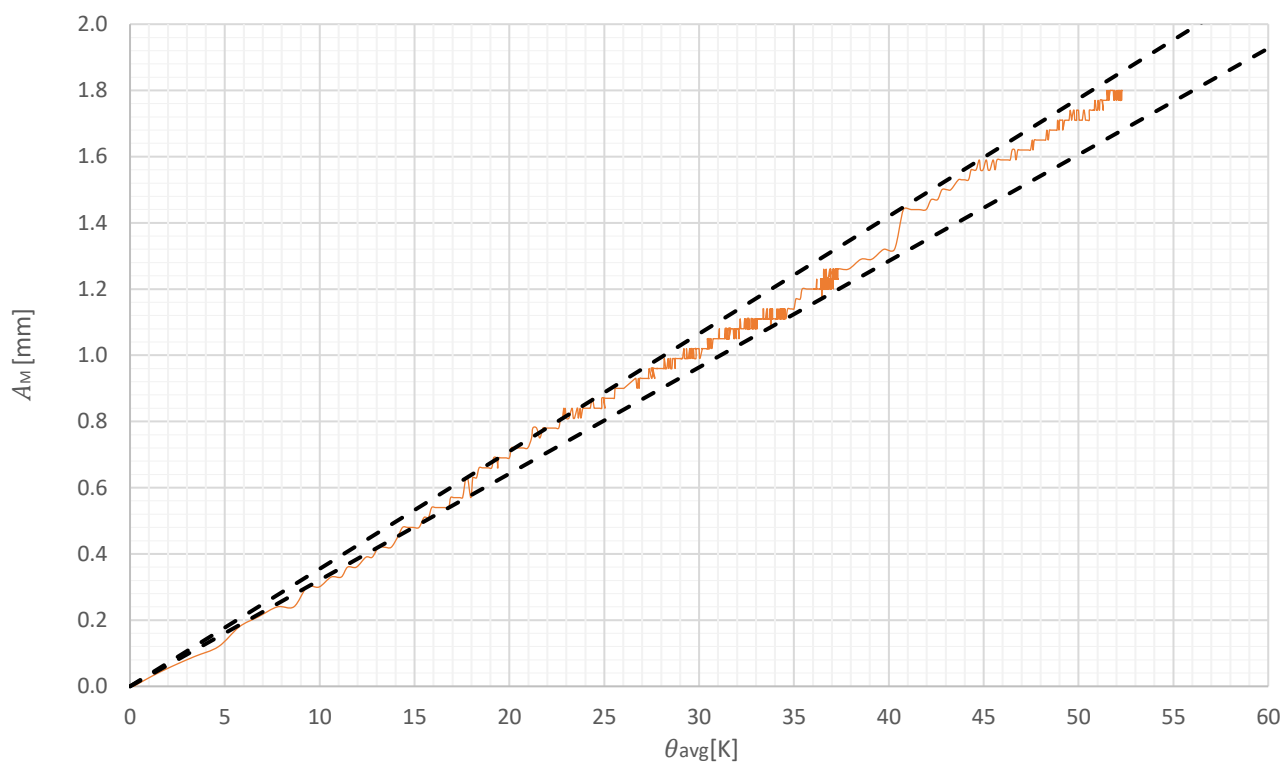
Nejdříve bylo sestaveno pracoviště, tak že jistič Siemens byl pevně připevněn ke stojanu. Následně byl umístěn laserový snímač optoNCDT do statické polohy kolmo k jističi a přímo pod terčík ve vzdálenosti 12 cm od něj. Z důvodů umožnění správného fungování snímače – odrazení laserového paprsku zpět do přijímače (viz Obr.8).

Zbytek přístrojů bylo zapojeno dle schématu z Obr. 7, do Univerzální měřicí ústředny AHLBORN ALMEMO 5690-2 bylo přivedeno 6 vstupů. Již tři zmíněné pro měření teploty bimetalu, další teplotní čidlo (termočlánek) měřilo okolní teplotu a bylo umístěno ve vzdálenosti 1 m od a ve stejné výšce jako jistič s bimetalem. Všechny čtyři zmíněné byly připojené za pomoci konektorů AHLBORN ALMEMO ZA9000-FS3. Další dva vstupy byly pro měření vzdálenosti terčíku a hodnotu proudu dodávanou zdrojem proudu přes Rogowského cívku. Obě hodnoty byly zaznamenávány přes napětí a následně přepočítané na požadované veličiny dle převodů 10 mV/A pro hodnotu proudu ze zdroje a 3 mm/V pro sledování průhybu bimetalu. Pro přesnější měření, kontrolu těchto hodnot a nastavování hodnot proudu ze zdroje sloužily dva multimetry.

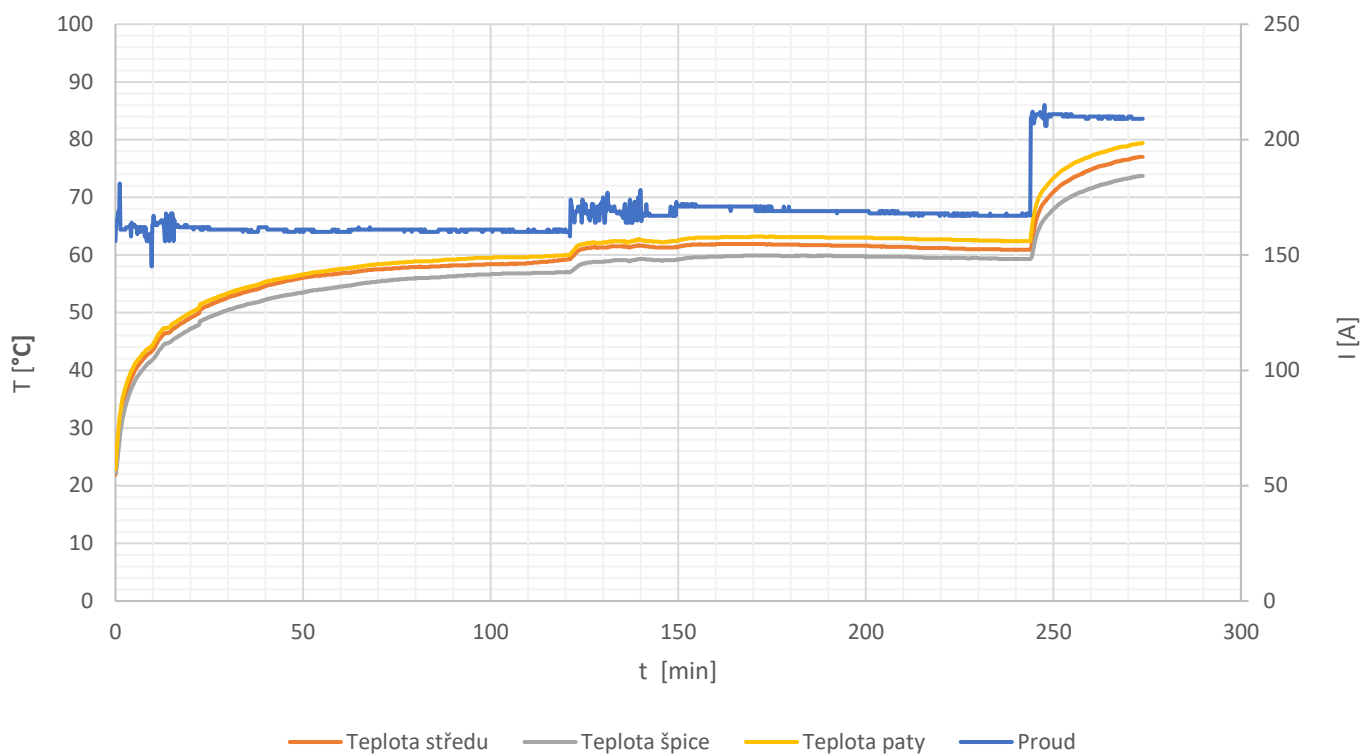
Po zapojení celého obvodu a připojení k napájení byly nejdříve zaznamenány výchozí hodnoty teplot, a hlavně výchozí poloha terčíku na měřicí ústřednu. Zapnutá ústředna zapisovala hodnoty (na paměťovou kartu) všech 6 vstupů po 10 s po dobu trvání celého měření. Měření probíhalo dle normy pro průmyslové jističe nn popsané v kapitole 4.3.2. Následně byla nastavená hodnota proudu na jmenovitý proud $I_n=160$ A. Po změně proudu vlivem zahřívání docházelo ke kolísání proudu, tudíž bylo nutné jej udržovat v mezích 160-163 A po dobu 2 h. Po určité době kolísání ustalo. Po proběhnutí první části zkoušky se proud dle normy zvýšil na $1,05 \cdot I_n = 168$ A, což je smluvený nevypínací proud. Prakticky byl opět udržován v mezích 168-171 A. Změna proudu byla opět doprovázena kolísáním, a taktéž trvala 2 h. V poslední části byl proud zvýšen na $1,3 \cdot I_n = 208$ A, avšak měření probíhalo pouze 30 min.

Po ukončení měření byla data z karty stažena a zpracována do požadovaných grafických závislostí. Teploty ze tří částí byly zprůměrovány a vyneseny do závislosti průhybu na průměrné teplotě doplněné o mez linearitu (viz Obr. 9). Další graf vyobrazuje závislost průhybu a proud na čase (Obr. 10). Poslední graf potom popisuje jednotlivé teploty částí bimetalu a proud v závislosti na čase (Obr. 11).

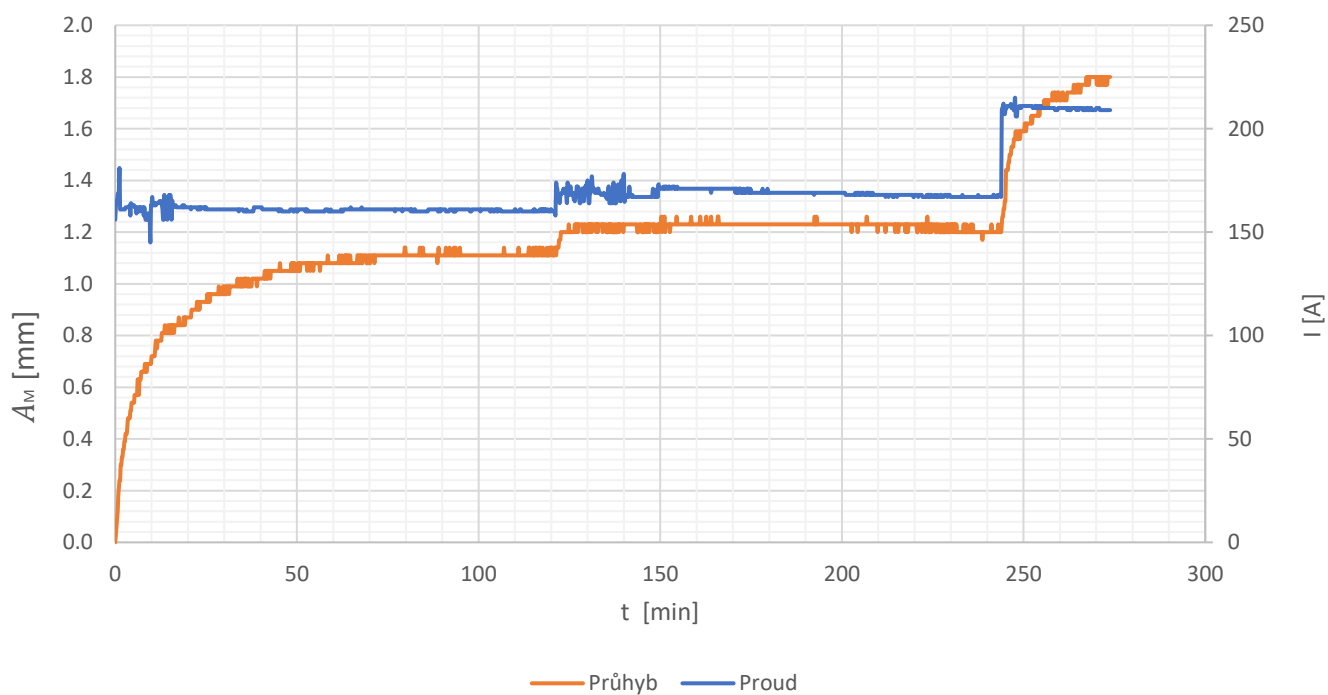
6.2 Výsledky měření



Obr. 9 Graf závislosti průhybu na průměrném oteplení (s vyznačenou mezí linearity)



Obr. 11 Graf závislosti teploty částí bimetalu a proudu na čase



Obr. 10 Graf závislosti průhybu a proudu na čase

6.3 Zhodnocení měření

Měření bylo prováděno při $I_n=160$ A po dobu 2 hodin, $1,05 \cdot I_n = 168$ A také 2 hodin, a $1,3 \cdot I_n = 208$ A po dobu 30 minut. Výstupem z měření dle zkoušky časově závislých spouští průmyslového jističe nn jsou tři grafické závislosti – Obr. 9,10,11.

Z Obr. 9 lze zjistit skutečnost, že s rostoucím oteplením roste přímo úměrně i průhyb bimetalu. Pro použitý bimetal pak konkrétně $0,0343$ mm/°C. Také lze upozorovat to, že se bimetal vcelku drží v mezích linearity, při nižších otepleních ovšem nikoliv. To může být způsobeno průměrováním teploty a mikro-pohyby bimetalu. Nejvyšší naměřená teplota (na konci měření) na bimetalu byla na patě $-79,4$ °C a průměr v celém bimetalu ve stejnou dobu byl $76,7$ °C.

Z Obr. 11 lze vidět, že při zvyšování proudu se začíná postupně zvyšovat i teplota (oteplení), přičemž maximální hodnoty θ_m (pro proud $I_n=160$ A) dosáhne přibližně po 65 minutách, z čehož se dá vypočítat přes vzorec $\theta = 0,632\theta_m = 45,7$ °C a z grafu lze stanovit časovou konstantu $\tau = 11$ min. Charakteristiky jednotlivých částí bimetalu jsou si podobné.

Poslední výstup je Obr. 10, který je charakteristikou podobný z Obr. 11, jelikož je průhyb k oteplení přímo úměrný. A také se zvyšujícím proudem zvětšuje průhyb, který ustálí přibližně ve stejnou dobu.

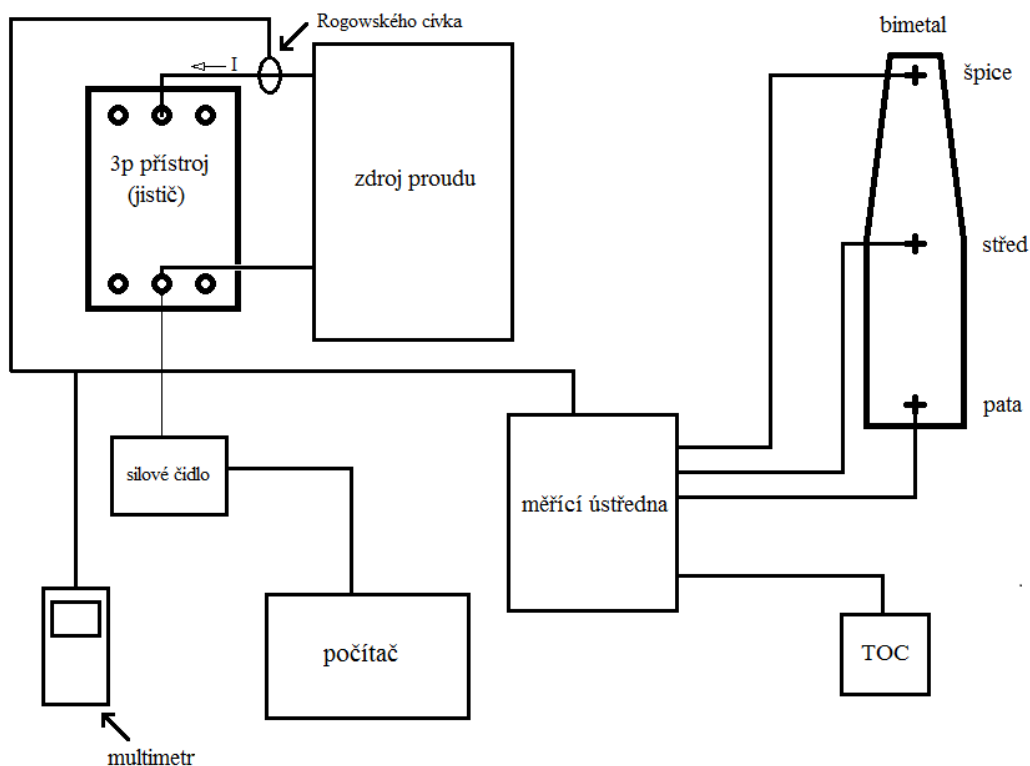
Celé měření (především při změně) doprovázelo kolísání proudu z důvodu oteplování. Což je vidět ve všech obrázcích (viz Obr. 9,10,11). Napomohl tomu i fakt, že regulace proudového zdroje byla velmi citlivá. Další nepřesnosti v měření mohlo kromě nepřesnosti měřicích přístrojů (ústředna měla ještě menší přesnost oproti multimetrům) způsobit i nerovnoměrné oteplování bimetalu (a následné průměrování), popř. vyšší odvod tepla v důsledku úpravy jističe.

7. MĚŘENÍ SÍLY VYTVÁŘENÉ BIMETALEM

Stejně jako v předchozím měření i zde bylo měření prováděno na bimetalu (tepelné spoušti) jističe Siemens. Bylo využito i stejných úprav jističe – odstranění západky pro předejití vybavení a zablokování vybavovacího mechanismu jističe, tak aby k vybavení nedošlo automaticky. Měření probíhalo pouze na prostředním pólu jističe. Pro účel zaznamenávání teploty bimetalu bylo opět využito tří termočlánků umístěných na patu, střed a špici. Nicméně terčík z předchozího měření (pro určování polohy) byl odstraněn a místo něj byl umístěn šroub připojený k silovému čidlu (viz Obr.13).

Při měření síly vytvářené bimetalem byly hodnoty zpracované do následujících charakteristik:

1. závislost síly na oteplení
2. závislost teploty a proudu na čase
3. závislost síly a proudu na čase



Obr. 12 Schéma zapojení jističe se silovým čidlem

Při měření byly použité přístroje:

Zdroj proudu

Jistič Siemens (upraven)

S2M/20N Force Transducer

Laboratorní zdroj Supply 230 V

Univerzální měřicí ústředna AHLBORN ALMEMO 5690-2

Rogowského cívka

Transformátor 129255 JDV

Měřicí modul HBM QuantumX MX440A

Měřicí modul AHLBORN ALMEMO ZA 9903-AB2; AC napětí do 400 V ef., přesnost $\pm 0,1\%$ z rozsahu ± 2 digity [13]

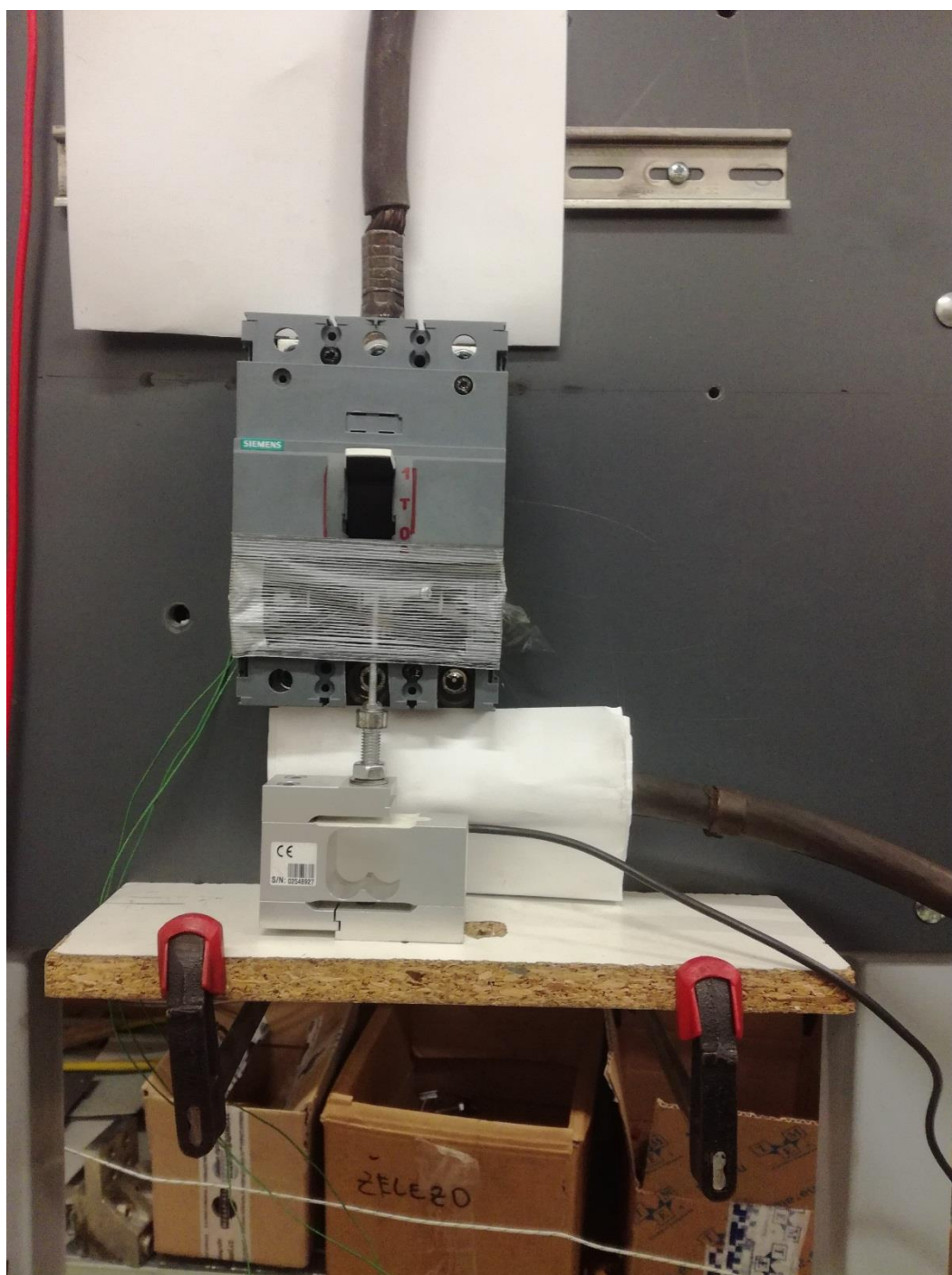
4x Termočlánek K

Konektor AHLBORN ALMEMO ZA9900-AB Digi R3 E4

3x Konektor AHLBORN ALMEMO ZA9000-FS3; DC napětí $\pm 2,6$ V

Multimetr Hexagon 340A; pro 50 Hz přesnost:

AC napětí $\pm(0,5 + 3 \text{ digity})$ v celém rozsahu, DC napětí $\pm(0,12 + 2 \text{ digity})$ pro rozsah 50mV, $\pm(0,06 + 2 \text{ digity})$ pro 500mV, $\pm(0,08 + 2 \text{ digity})$ pro rozsah 5V a vyšší [12]



Obr. 13 Zapojení jističe (bimetalu) se silovým čidlem

7.1 Postup měření

Sestavení pracoviště bylo podobné jako v předchozím měření (kapitola 6.). Jistič byl připevněn ke stojanu, následně bylo přímo pod jistič do statické polohy umístěno silové čidlo. Síla vytvářená bimetalem byla přenášena pomocí šroubu připevněného k čidlu přímo pod bimetalem (viz Obr. 13).

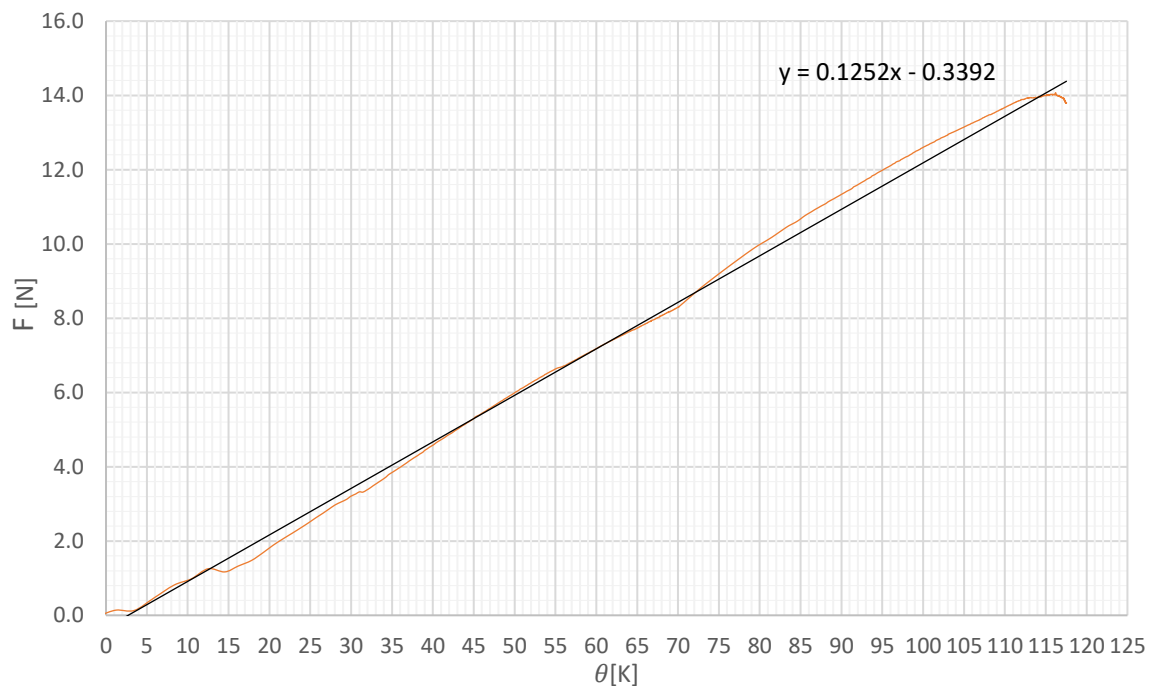
Ostatní přístroje byly zapojené dle schématu z Obr. 12. Data ze silového čidla byla zaznamenávána pomocí počítače. Do Univerzální měřicí ústředny AHLBORN ALMEMO 5690-2 bylo přivedeno 5 vstupů – 3 z nich sloužily k již zmíněnému zaznamenávání teplot bimetalu (za pomoci termočlánků z paty, středu a špice), další vstup zaznamenával teplotu okolí. Termočlánek pro měření teploty okolí byl umístěn ve vzdálenosti asi 1 m a stejné výšce jako jistič. Všechny čtyři zmíněné byly připojené k ústředně za pomoci konektorů AHLBORN ALMEMO ZA9000-FS3. Poslední vstup zaznamenával velikost proudu vytvářeného zdrojem přes Rogowského cívka a konektor ALMEMO ZA 9903-AB Digi R3. Kontrolu hodnot zajišťoval multimetr.

Po zapojení obvodu byl nejprve nastaven počítač pro zaznamenávání hodnot ze silového čidla po každých 10 s průběhu měření a počáteční síla nastavena na 0 N. Zároveň byly také zaznamenány počáteční teploty vstupů (okolí, pata, střed, špice). Ústředna rovněž zapisovala hodnoty teplot a proud po 10 s v celém průběhu měření.

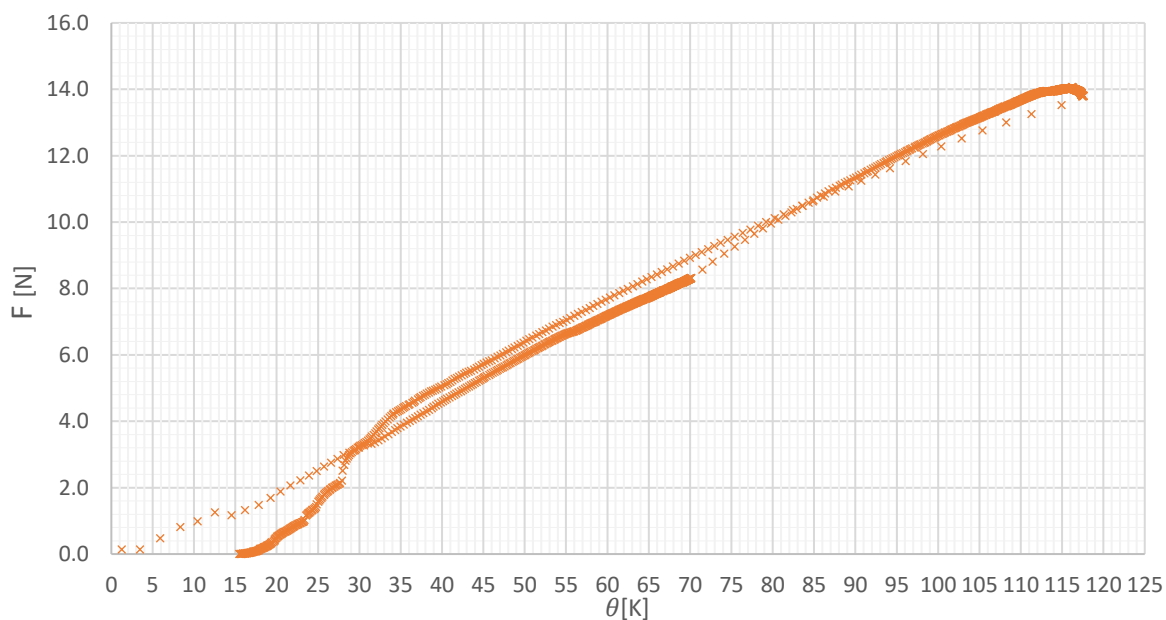
Na počátku měření byla nastavena hodnota jmenovitého proudu na $I_n=250$ A. Změnou proudu docházelo k zahřívání vodičů, a tudíž kolísáním proudu, proto bylo nutné proud dodatečně regulovat. Proud byl udržován udržovat v mezích 250-260 A po dobu přibližně 1 h. V další části měření byl proud zvýšen na $1,3 \cdot I_n = 325$ A po dobu přibližně 1,5 h. V poslední části byl odpojen zdroj proudu ($I = 0$ A) a byla změřena charakteristika při ochlazování bimetalu.

Po provedení měření byla data zaznamenána ústřednou a počítačem sjednocena a zpracována do požadovaných charakteristik ze začátku kapitoly.

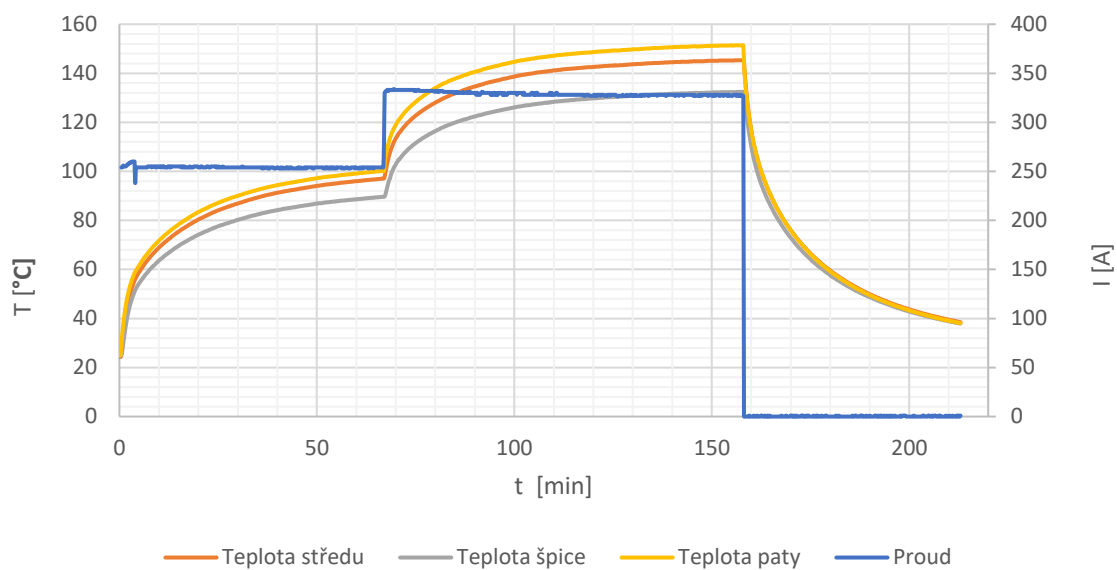
7.2 Výsledky měření



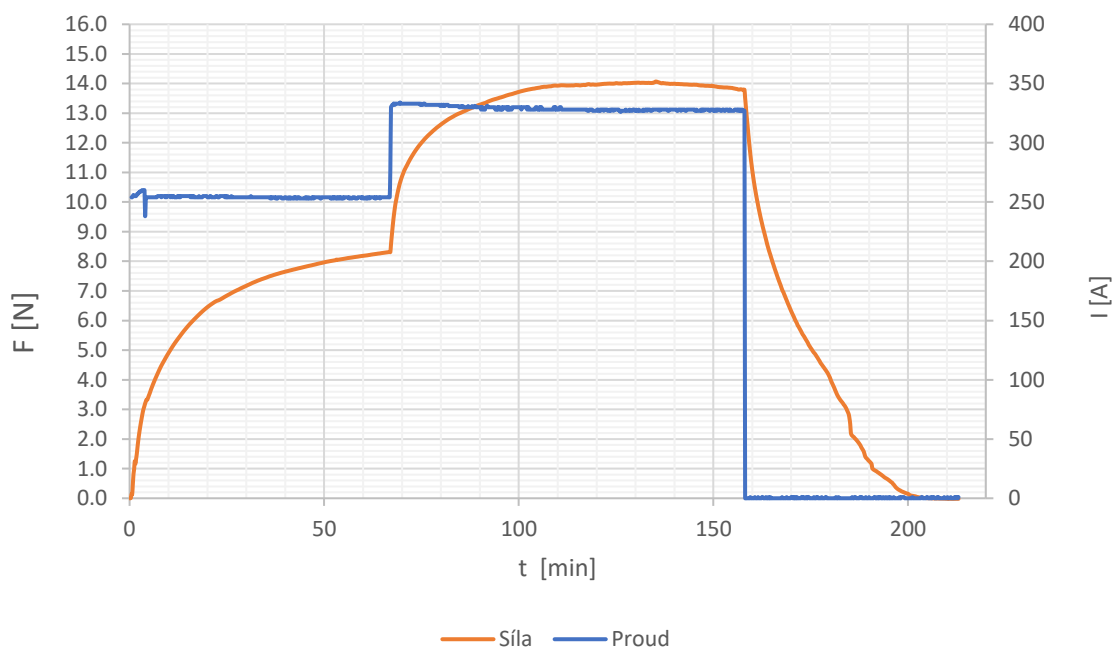
Obr. 15 Graf závislosti síly na průměrném oteplení (s přímkou linearity)



Obr. 14 Graf závislosti síly na průměrném oteplení - bodový (včetně ochlazování)



Obr. 16 Graf závislosti teploty a proudu na čase



Obr. 17 Graf závislosti síly a proudu na čase

7.3 Zhodnocení měření

Měření charakteristik bylo provedeno při jmenovitém proudu $I_n = 250$ A po dobu 1 h, poté byl proud zvýšen na $1,3 \cdot I_n = 325$ A, a udržován po dobu 1,5 h. Následně byl proud snížen na $I = 0$ A a hodnoty byly měřeny při ochlazování bimetalu. Výstupem z měření síly vytvářené bimetalem jsou 4 grafické závislosti – Obr. 14-17.

Z Obr. 15 lze vidět, že s rostoucí teplotou roste i přímo úměrně síla vytvářená deformací bimetalu. Grafem byla proložena lineární spojnice trendu. Číselně to poté pro použitý bimetal vychází na $0,1252$ N/°C. Menší odchylky mohou být způsobeny odpružením plošiny, na které bylo umístěno silové čidlo či nerovnoměrným oteplením bimetalu a průměrováním. Nejvyšší naměřená teplota na bimetalu byla na patě – $151,4$ °C, přičemž ve stejný moment byla průměrná teplota bimetalu $143,03$ °C při teplotě okolí $25,6$ °C.

Obr. 14 zobrazuje stejnou charakteristiku jako Obr. 15, nicméně je zobrazen bodově a doplněn o hodnoty při ochlazování bimetalu. Hodnoty při ochlazování vyšly relativně podobně jako při oteplování. Odchylky jsou pravděpodobně způsobeny průhybem plošiny se silovým čidlem.

Další charakteristika (viz Obr. 16) ukazuje změnu teploty jednotlivých částí bimetalu v čase při různých proudových nastaveních. Při zvýšení proudu se postupně zvyšuje i teplota bimetalu. Maximální hodnoty oteplení θ_m (pro proud $I_n=250$ A) dosáhne bimetal za přibližně 65 minut. Lze tedy ze vzorce vypočítat $\theta = 0,632\theta_m = 71,58$ °C a z grafu lze stanovit časovou konstantu $\tau = 11$ min. Druhá část grafu zobrazuje vývoj teplot pro $1,3 \cdot I_n = 325$ A. A třetí část zobrazuje ochlazování bimetalu při $I = 0$ A.

Poslední charakteristika (Obr. 17) je graficky podobný předchozímu, protože síla vytvořená bimetalem při deformaci je přímo úměrná oteplení, což lze vidět z Obr. č 15. Také proto se růst síly i teplot ustaluje přibližně ve stejnou dobu.

Měření doprovázely nepřesnosti způsobené měřicími přístroji, průhybem plošiny se silovým čidlem či nerovnoměrné oteplování bimetalu a jeho průměrování v grafickém zpracování. Menší odchylky mohlo způsobit mírné kolísání proudu a citlivé regulaci.

8. LABORATORNÍ PRÁCE – MĚŘENÍ NA BIMETALU

V poslední kapitole byla jako součástí bakalářské práce zpracována laboratorní práce – Měření na bimetalu. Zadání laboratorní práce je obsaženo v přílohách (viz Příloha 3).

Měření probíhá na novém pracovišti, které se nechalo zhotovit (viz Obr.18). Dané pracoviště má několik výhod oproti zapojením z předchozích kapitol. Jeho pevná konstrukce zamezuje průhybu čidla, a tím výskytu chyby měření. Jako tomu bylo v předchozí kapitole při práci se silovým čidlem připevněným k plošině.

Pracoviště také umožňuje upevnění měřeného prvku a posun čidla do 3 směrů. Což zajistí rychlejší, a hlavně přesnější pozicování čidla, tudíž snížení nepřesností měření.



Obr. 18 Měřicí pracoviště pro laboratorní práci

ZÁVĚR

Bakalářská práce se věnovala bimetalům, přesněji tedy jeho fungování jakožto prvku tepelné spouště.

Začátek práce pojednává o různých využitích, principu funkce a popisu materiálových vlastností bimetalů. Především je věnován prostor matematickému popisu vlastností jako je měrná tepelná křivost a měrný tepelný ohyb. Dále je v práci obsažen podrobný matematický popis způsobů vyhřívání bimetalů. V závěru teoretické části jsou popsány i části norem, které pojednávají o jističích, což souvisí s bimetaly, jelikož se nejčastěji využívají jakožto tepelná spoušť pro vybavení přetížení. Jsou zde zmíněny i zkoušky norem, které se provádějí.

Praktická část se pak právě podobnou zkouškou na jističi zabývá. Byly naměřeny závislosti průhybu na oteplení při $I_n=160$ A po dobu 2 hodin, $1,05 \cdot I_n = 168$ A také 2 hodin, a $1,3 \cdot I_n = 208$ A po dobu 30 minut (grafy charakteristik jsou obsažené v kapitole 6.2). Z nich se dá vyčíst přímo úměrná závislost průhybu na průměrném oteplení, také závislost průhybu i oteplení na proudu v čase. Z charakteristik lze taktéž vyčíst maximální oteplení θ_m a τ časové konstanty pro jednotlivá proudová zatížení.

V další část měření byla proměřena závislost síly vytvářené bimetalem na oteplení při $I_n = 250$ A po dobu 1 h, a následně $1,3 \cdot I_n = 325$ A po dobu 1,5 h. Následně byl proud snížen na $I = 0$ A. Naměřené charakteristiky (kapitola 7.2) ukazují přímo úměrnou závislost síly na průměrném oteplení (i ochlazení). Dále tako závislost průměrného oteplení a síly na jmenovitém proudu.

Poslední část bakalářské práce byla věnována vytvoření laboratorní práce (Příloha 3) na novém měřicím pracovišti (Obr. 18), které v důsledku jeho konstrukce umožňuje přesnější měření charakteristik.

Literatura

- [1] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I.*, Vysoké učení technické v Brně, 1988
- [2] *SHIVALIK THERMOSTATIC BIMETAL Handbook* [online]. Kalkaji New Delhi (India): SHIVALIK BIMETAL CONTROLS [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://www.shivalikbimetals.com/Catalogue.pdf>
- [3] *Kanthal Thermostatic Bimetal Handbook* [online]. Hallstahammar, Sweden: Kanthal part of Sandvik AB. [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.ibt.co.il/uploaded_files/documents/Kanthal_Thermostatic_Bimetal_U3743.pdf
- [4] *Thermostatic Bimetal* [online]. Attleboro, MA (USA): Engineered Materials Solutions (Wickeder Group) [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: https://www.emsclad.com/fileadmin/Data/Divisions/EMS/Thermostatic_Bimetal.pdf
- [5] Bimetals. <https://www.electrical4u.com/> [online]. 2018 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/bimetals/>
- [6] Příklad konstrukce jističe. In: <https://www.elektro-materialy.cz/> [online]. [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: https://www.elektro-materialy.cz/files/static_pages_files/images/Jisti%C4%8D%20funkce%20a%20popis%20obr.2.jpg
- [7] ČSN EN 60947-2. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe*. Ed. 4. Česká Republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [8] ČSN EN 60898-1. *Elektrická příslušenství - Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací - Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)*. Česká Republika: Český normalizační institut, 2003.
- [9] FALTUS, Ivo OEZ s. r. o. Princip volby jisticích přístrojů. *Časopis Elektro* [online]. 2004, **10/2004** [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/principy-volby-jisticich-pristroju--13920>

- [10] Measuring module for AC voltage. *Loging electronics* [online]. © 2013-2019 [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: http://www.logingel.com/1003/182763/0/ShowProduct/Measuring_module_for_AC_voltage
- [11] STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ - MĚŘICÍ MODUL AHLBORN ALMEMO ZA9900AB3. *AHLBORN Přesná německá měřicí technika* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/cidla-a-snimace/elektricke-veliciny/stejnoserne-napeti-merici-modul-ahlborn-almemo-za9900ab3.html>
- [12] Digitální multimetr Hexagon - Amprobe 340A. *AMT měřicí technika* [online]. 2011 [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <http://www.amt.cz/index.php?id=HEX340>
- [13] STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ - MĚŘICÍ MODUL AHLBORN ALMEMO ZA9903AB2. *AHLBORN Přesná německá měřicí technika* [online]. [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/stridave-napeti-merici-modul-ahlborn-almemo-za9903ab2.html>

Seznam příloh

Příloha 1 - Naměřené hodnoty volného průhybu

Tabulky naměřených hodnot pro úvodní měření volného průhybu jsou uloženy v Excelu v elektronické podobě.

Příloha 2 - Naměřené hodnoty síly vytvářené bimetalem

Tabulky naměřených hodnot pro měření síly vytvářené bimetalem jsou uloženy v Excelu v elektronické podobě.

Příloha 3 - Laboratorní práce

Zpracování laboratorní práce – Měření na bimetalu je uloženo v pdf v elektronické podobě.