

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

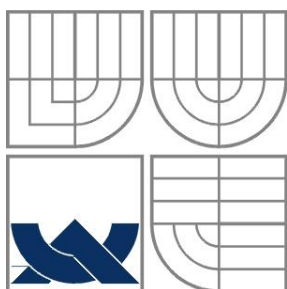
ANALÝZA BIMETALOVÉ SPOUŠTĚ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

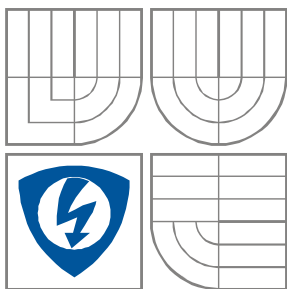
Bc. MICHAL ZELENKA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ANALÝZA BIMETALOVÉ SPOUŠTĚ

ANALYSIS OF A BIMETAL RELEASE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

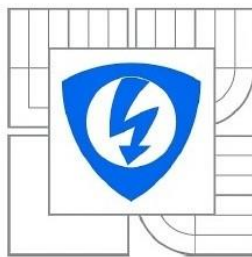
Bc. MICHAL ZELENKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Michal Zelenka
Ročník: 2

ID: 136600
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Analýza bimetalové spouště

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip bimetalové spouště a možná konstrukční řešení.
2. Zpracujte analytický návrh bimetalové spouště pro zadaný typ bimetalu a požadované pracovní charakteristiky.
3. Předchozí návrh ověřte měřením - závislost průhybu a síly na oteplení.
4. Připravte numerický model chování bimetalu pro zadaný stav.
5. Získané výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 198
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] Kolektiv autorů: Kanthal Thermostatic bimetal handbook, 2008

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

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

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 diplomová práce se zabývá tepelnou spouští v elektrických samočinných spínacích přístrojích. První část práce slouží jako podklad pro návrh bimetalového prvku v tepelné nadproudové spoušti spínacího přístroje. Uvádí parametry a výpočtové vztahy nutné k návrhu bimetalu. Práce dále popisuje princip tepelné spouště a možná konstrukční řešení. Hlavní část je věnována analytickému návrhu tepelné spouště v kompaktním jističi pro zadaný typ bimetalu a požadované pracovní charakteristiky a následnému ověření vypracovaného návrhu měřením. Jedná se zejména o měření závislosti průhybu a síly na oteplení. V následující části byl vytvořen numerický model chování bimetalu, na kterém byla provedena simulace průhybu. V závěru práce je provedeno porovnání výsledků získaných z analytického návrhu s výsledky získanými měřením a simulací.

Abstract

This master's thesis deals with the thermal overload trip unit in automatically operated electrical switching devices. The first part of this thesis serves as a basis for a design of thermostatic bimetal element in electrical switching device. The thesis presents important parameters and calculation principles needed for the design of bimetal element. The thesis further describes the operating principle of thermal trip unit and its possible design solutions. The main part is devoted to analytical calculation and measurement of specific thermostatic bimetal type contained in thermal trip unit of molded case circuit breaker. It is measurement of force and deflection, depending on temperature change. In the next part a numerical model of the bimetallic strip was created and its deflection was simulated. The analytical results are compared with the measured and simulated results at the end of the thesis.

Klíčová slova

Bimetal; Nadproudová spoušť; Tepelná spoušť; Kompaktní jistič; Výpočet; Měření; Simulace

Keywords

Thermostatic Bimetal; Overcurrent trip unit; Thermal overload trip unit; Molded case circuit breaker; Calculation; Measurement; Simulation

Bibliografická citace

ZELENKA, M. *Analýza bimetalové spouště*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza bimetalové spouště jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

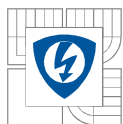
Podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne

Podpis autora

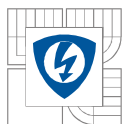


OBSAH

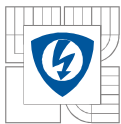
SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	14
2 BIMETALOVÁ SPOUŠŤ VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH	16
2.1 Princip činnosti bimetalu	16
2.2 Materiály bimetalů	17
2.3 Parametry bimetalu nutné k návrhu	19
2.4 Výpočet bimetalu	28
2.5 Princip činnosti tepelné nadproudové spouště	36
2.6 Konstrukční řešení tepelných nadproudových spouští	37
2.7 Meze vypínací charakteristiky tepelné nadproudové spouště	39
3 ANALYTICKÝ NÁVRH BIMETALOVÉ SPOUŠTĚ	40
3.1 Nadproudová spoušť v kompaktním jističi Sentron 3VA12	40
3.2 Výchozí předpoklady pro analytický návrh	43
3.3 Výpočet volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení	44
3.4 Výpočet síly vyvíjené bimetalem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu	45
3.5 Výpočet síly vyvíjené bimetalem v závislosti na částečně omezeném průhybu	47
3.6 Výpočet průhybu bimetalu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec	48
3.7 Zhodnocení analytického návrhu	49
4 MĚŘENÍ NA BIMETALOVÉ SPOUŠTI	51
4.1 Měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení	51
4.2 Měření síly vyvíjené páskem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu	59
4.3 Měření průhybu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec	64
4.4 Zhodnocení měření	68
5 NUMERICKÝ MODEL CHOVÁNÍ BIMETALU	72
5.1 Vytvoření numerického modelu v programu SolidWorks	72
5.2 Simulace ustáleného oteplení bimetalu	73
5.3 Simulace volného průhybu bimetalu	76
5.4 Zhodnocení simulace	79
6 ZÁVĚR	80
LITERATURA	81
PŘÍLOHY	83

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Princip činnosti bimetalu</i>	17
<i>Obr. 2: Ukázka struktury bimetalu [1]</i>	18
<i>Obr. 3: Příklad teplotní závislosti součinitele délkové roztažnosti a měrné tepelné křivosti [1] ..</i>	20
<i>Obr. 4: Zakřivení prostě podepřeného bimetalového nosníku [1]</i>	21
<i>Obr. 5: Průhyb jednostranně upevněného bimetalového pásku [1]</i>	22
<i>Obr. 6: Tvrdost podle Vickerse jako funkce teploty [1]</i>	22
<i>Obr. 7: Rozmezí linearity [2]</i>	23
<i>Obr. 8: Teplotní závislost modulu pružnosti v tahu pro slitiny FeNi20Mn6 a FeNi36 [1]</i>	24
<i>Obr. 9: Příklad závislosti maximálního ohybového napětí na teplotě [1]</i>	27
<i>Obr. 10: Definice rozměrů pro jednostranně upevněný přímý pásek obdélníkového tvaru [2] ..</i>	29
<i>Obr. 11: Definice rozměrů pro jednostranně upevněný přímý pásek zkoseného tvaru [1]</i>	31
<i>Obr. 12: Tepelná (časově závislá) vypínací charakteristika</i>	36
<i>Obr. 13: Jistič s termomagnetickou nadproudovou spouští pro domovní instalace [5]</i>	38
<i>Obr. 14: Příklad kompenzace teploty okolí [1]</i>	38
<i>Obr. 15: Kompaktní jistič Sentron 3VA12 [6]</i>	40
<i>Obr. 16: Termomagnetická nadproudová spoušť TM240 v jističi Sentron 3VA12 [6]</i>	41
<i>Obr. 17: Jeden pól termomagnetické nadproudové spouště TM240</i>	42
<i>Obr. 18: Základní geometrie bimetalu TB 185/08 obsaženého v nadproudové spoušti TM240. ..</i>	42
<i>Obr. 19: Vypínací charakteristika jističe Sentron 3VA12 [6]</i>	43
<i>Obr. 20: Geometrie bimetalu TB 185/08 uvažovaná v analytickém návrhu</i>	44
<i>Obr. 21: Teoretická závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení</i>	45
<i>Obr. 22: Teoretická závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu</i>	47
<i>Obr. 23: Teoretická závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě</i>	48
<i>Obr. 24: Teoretická závislost průhybu bimetalu TB 185/08 na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě</i>	49
<i>Obr. 25: Místa měření teploty na pasivní vrstvě bimetalu TB 185/08</i>	52
<i>Obr. 26: Schéma zapojení pro měření volného průhybu bimetalu</i>	53
<i>Obr. 27: Měření volného průhybu bimetalu</i>	54
<i>Obr. 28: Změřená závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení při ohřevu proudem $I = 262,5 \text{ A}$</i>	57
<i>Obr. 29: Změřená závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení při ohřevu</i>	



<i>proudem $I = 325\text{ A}$.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 30: Změřená závislost oteplení bimetalu TB 185/08 na čase</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 31: Změřená závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na čase</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 32: Schéma zapojení pro měření síly vyvíjené bimetalem při zcela omezeném průhybu ...</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 33: Měření síly vyvíjené bimetalem při zcela omezeném průhybu</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 34: Změřená závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu a při ohřevu proudem $I = 262,5\text{ A}$</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 35: Změřená závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu a při ohřevu proudem $I = 325\text{ A}$</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 36: Změřená závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu a při ohřevu proudem $I = 470\text{ A}$</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 37: Měření průhybu v závislosti na protisíle při konstantní teplotě</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 38: Změřená závislost průhybu bimetalu TB 185/08 na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě a při silovém působení proti směru přirozeného tepelného průhybu.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 39: Změřená závislost průhybu bimetalu TB 185/08 na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě a při silovém působení ve směru přirozeného tepelného průhybu.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 40: Model jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240, vytvořený v programu SolidWorks.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 41: Simulace ustáleného oteplení jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240 při ohřevu proudem $I = 262,5\text{ A}$.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 42: Simulace ustáleného oteplení jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240 při ohřevu proudem $I = 325\text{ A}$.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 43: Simulace ustáleného oteplení bimetalu TB 185/08 při ohřevu proudem $I = 262,5\text{ A}$..</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 44: Simulace ustáleného oteplení bimetalu TB 185/08 při ohřevu proudem $I = 325\text{ A}$.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 45: Simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 262,5\text{ A}$</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 46: Simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 325\text{ A}$</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 47: Detail simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 262,5\text{ A}$.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 48: Detail simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 325\text{ A}$.....</i>	<i>78</i>

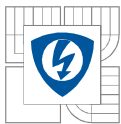


SEZNAM TABULEK

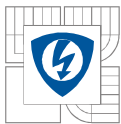
<i>Tab. 1: Meze vypínací charakteristiky kompaktních jističů podle ČSN EN 60947-2 [5].....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 2: Parametry kompaktního jističe Sentron 3VA12 [6]</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3: Parametry bimetalu TB 185/08 [1].....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4: Vypočtené hodnoty volného průhybu bimetalu TB 185/08 v závislosti na oteplení.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5: Vypočtené hodnoty síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 při zcela omezeném průhybu v závislosti na oteplení</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6: Vypočtené hodnoty síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 v závislosti na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 7: Vypočtené hodnoty průhybu bimetalu TB 185/08 v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 8: Seznam použitých přístrojů pro měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 9: Seznam použitých přístrojů pro měření síly vyvíjené bimetalem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 10: Seznam použitých přístrojů pro měření průhybu v závislosti na protisíle při konstantní teplotě.....</i>	<i>66</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
A	průhyb bimetalu	[mm]
A_m	průhyb při působení protisíly vybavovacího mechanismu	[mm]
A_{mm}	měřená hodnota průhybu při působení protisíly	[mm]
A_{ms}	teoretická hodnota průhybu při působení protisíly	[mm]
A_u	částečně omezený průhyb bimetalu	[mm]
A_v	volný průhyb bimetalu	[mm]
A_{vm}	měřená hodnota volného průhybu	[mm]
A_{vs}	teoretická hodnota volného průhybu	[mm]
Δ_A	absolutní chyba měření průhybu	[mm]
δ_A	relativní chyba měření průhybu	[%]
a	měrný tepelný průhyb	[K ⁻¹]
b	šířka bimetalu	[mm]
b_1, b_2	šířka zkoseného bimetalu	[mm]
c	měrná tepelná kapacita bimetalu	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
c_m	střední měrná tepelná kapacita bimetalu	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
c_v	měrná objemová tepelná kapacita bimetalu	[J·m ⁻³ ·K ⁻¹]
E	modul pružnosti v tahu bimetalu	[MPa]
E_1	modul pružnosti v tahu aktivní vrstvy	[MPa]
E_2	modul pružnosti v tahu pasivní vrstvy	[MPa]
F	síla vyvíjená bimetalem	[N]
F_1, F_2	síly vyvolávající ohyb bimetalu	[N]
F_m	protisíla vybavovacího mechanismu	[N]
F_{max}	maximální přípustná síla vyvíjená bimetalem	[N]
F_u	síla vyvíjená páskem při částečně omezeném průhybu	[N]
F_{um}	měřená hodnota síly při částečně omezeném průhybu	[N]
F_{us}	teoretická hodnota síly při částečně omezeném průhybu	[N]
F_o	síla vyvíjená páskem při zcela omezeném průhybu	[N]
F_{om}	měřená hodnota síly při zcela omezeném průhybu	[N]
F_{os}	teoretická hodnota síly při zcela omezeném průhybu	[N]
Δ_F	absolutní chyba měření síly	[N]
δ_F	relativní chyba měření síly	[%]
I	efektivní hodnota proudu	[A]
I_n	jmenovitý proud jističe (nadproudové spouště)	[A]



I_{nt}	smluvený nevypínací proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
I_r	redukovaný jmenovitý proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
I_t	smluvený vypínací proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
k	měrná tepelná křivost	[K ⁻¹]
L	aktivní délka bimetalu	[mm]
L_1	aktivní délka bimetalu uvažovaná při měření volného průhybu	[mm]
ΔL_1	prodloužení aktivní vrstvy	[mm]
ΔL_2	prodloužení pasivní vrstvy	[mm]
l	měřená vzdálenost terčíku při měření volného průhybu	[mm]
$l_{poč}$	počáteční měřená vzdálenost terčíku při měření volného průhybu	[mm]
m	hmotnost	[g]
n	součinitel poměru šířky vrstev	[-]
P	povrch	[m ²]
Q	množství tepla	[Ws]
R	elektrický odpor	[Ω]
S	plocha	[m ²]
s	celková tloušťka	[mm]
s_1	tloušťka aktivní vrstvy	[mm]
s_2	tloušťka pasivní vrstvy	[mm]
s_3	tloušťka mezivrstvy	[mm]
T	teplota	[°C]
T_1	počáteční teplota	[°C]
T_2	koncová teplota	[°C]
ΔT	oteplení	[K]
T_A	poměr oteplení použitého na průhyb	[K]
T_F	poměr oteplení použitého na vyvinutí síly	[K]
T_a	měřená teplota pracovního konce bimetalu	[°C]
T_b	měřená teplota pevného konce bimetalu	[°C]
ΔT_a	oteplení pracovního konce bimetalu	[K]
ΔT_b	oteplení pevného konce bimetalu	[K]
T_0	měřená teplota okolí	[°C]
t	čas	[s]
U	elektrické napětí	[V]
V	objem	[mm ³]
V_{min}	minimální objem	[mm ³]



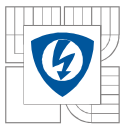
α	teplotní součinitel délkové roztažnosti	[K ⁻¹]
α_0	měrná chladivost povrchu	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_1	teplotní součinitel délkové roztažnosti aktivní vrstvy	[K ⁻¹]
α_2	teplotní součinitel délkové roztažnosti pasivní vrstvy	[K ⁻¹]
γ	hustota	[g·cm ⁻³]
δ	tloušťka izolační vrstvy	[m]
ε	teplotní součinitel elektrického odporu	[K ⁻¹]
ρ	měrný elektrický odpor	[μΩ·m]
ρ_1	měrný elektrický odpor při teplotě T_1	[μΩ·m]
ρ_2	měrný elektrický odpor při teplotě T_2	[μΩ·m]
λ	tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
$\sigma_{\max}$	maximální ohybové napětí	[MPa]
φ	úhel mezi pracovním koncem pásku a jeho původní polohou	[°]
ψ	součinitel pro výpočet zkoseného pásku	[-]

1 ÚVOD

Silnoproudá elektrická zařízení (elektromotory, transformátory, rozváděče, atd.) jsou zařízení, jejichž případné poškození má vzhledem k jejich poměrně vysoké ceně za následek vážné ekonomické dopady. Proto byly vytvořeny takové podmínky ochrany zařízení, které zajišťují, aby k jejich poškození nemohlo dojít. Obrovský význam v této souvislosti má ochrana před nedovolenými tepelnými a silovými účinky nadproudů, tedy jištění elektrického zařízení. Nadproudem je každý proud, který převyšuje jmenovitý proud určitého zařízení. Jedná se o proudy velice málo převyšující jmenovitý proud elektrického zařízení vznikající při přetížení, ale také o proudy výrazně převyšující jmenovitý proud zařízení, tedy zkratové proudy vznikající při poruchových stavech v obvodu. Elektrická zařízení jsou před nežádoucími tepelnými a silovými účinky nadproudu chráněna (jištěna) samočinnými mechanickými spínacími přístroji neboli jističi. [5]

Pro jištění elektrických zařízení před účinky tepla při nadproudech se v elektrických spínacích přístrojích používá mnoho zařízení ke snímání a vyhodnocování nadproudů. Mezi nejpoužívanější taková zařízení v současné době patří bimetal (dvojkovy), elektromagnety a elektronické (mikroprocesorové) vyhodnocování nadproudu pomocí přístrojových transformátorů proudu nebo Rogowského cívek. Mikroprocesor, proudové transformátory a další elektronické součástky tvoří základní konstrukční prvky elektronických nadproudových spouští. Bimetal a elektromagnety pak tvoří základní konstrukční prvky klasických nadproudových spouští. Podle toho je možné klasické nadproudové spouště rozdělit na dva základní typy, tepelnou - tvořenou bimetalem a zkratovou - tvořenou elektromagnetem. V případě, že tepelná a zkratová spoušť tvoří jeden celek, jedná se o spoušť termomagnetickou. Nadproudová spoušť je spolu s kontaktním, spínacím a zhášecím systémem základním funkčním prvkem samočinných mechanických spínacích přístrojů (jističů, spouštěčů motoru, atd.). Dává pokyn k vybavení přístroje přímým působením na jeho spínací systém. Na druhu nadproudové spouště, tj. na způsobu snímání a vyhodnocování proudu procházejícího jištěným zařízením (a tedy i jisticím přístrojem) je částečně založen princip funkce celého přístroje. [5]

Tato práce se zabývá tepelnou (bimetalovou) nadproudovou spouští v elektrických spínacích přístrojích. Základním prvkem tvořícím tepelnou spoušť je bimetal. Proto se první část práce věnuje samotnému bimetalu a slouží jako podklad pro návrh bimetalového prvku v tepelné spoušti spínacího přístroje. Kromě principu činnosti bimetalu práce uvádí a podrobně rozebírá parametry bimetalu nutné k návrhu. Tato část se věnuje také výpočtu bimetalového prvku. Poskytuje přehled užitečných matematických vztahů pro výpočet v praxi nejčastěji používaných řešení. V následující



části je pak popsán princip činnosti tepelné spouště jakožto celku, včetně možných konstrukčních řešení.

Hlavní část práce se věnuje analytickému návrhu bimetalové spouště v kompaktním jističi pro zadaný typ bimetalu a požadované pracovní charakteristiky. Návrh je vypracován na základě výpočetních vztahů uvedených v předchozí části práce. Důležitou součástí je ověření vypracovaného návrhu měřením. Jedná se zejména o měření závislosti průhybu a síly bimetalu na oteplení. V následující části byl v programu SolidWorks vytvořen numerický model bimetalu z předchozího analytického návrhu, na kterém byla provedena simulace průhybu. V závěru práce je provedeno porovnání výsledků získaných z analytického návrhu s výsledky získanými měřením a simulací.

2 BIMETALOVÁ SPOUŠŤ VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH

Bimetal je klasický prvek, který se ve spínacích přístrojích používá zejména ke snímání malých nadproudů způsobených přetíženími. Je hlavním konstrukčním prvkem tepelných nadproudových spouští a tepelných nadproudových relé. [5] [4]

2.1 Princip činnosti bimetalu

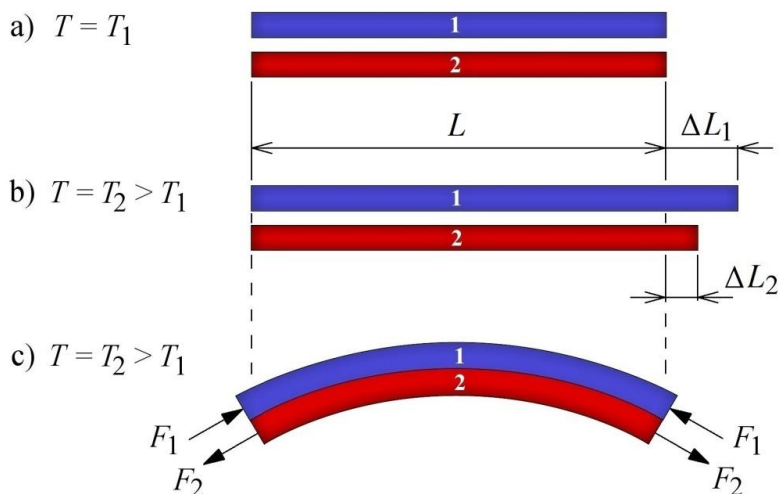
Bimetal je tvořen dvěma vrstvami kovů (1 a 2 na Obr. 1), z nichž každá má jinou hodnotu teplotního součinitele délkové roztažnosti $\alpha_1 > \alpha_2$. Obě vrstvy jsou přitom pevně spojeny v celé stykové ploše. Vrstva 1 s materiálem s větší hodnotou teplotního součinitele délkové roztažnosti α_1 se nazývá vrstva aktivní, vrstva 2 s materiálem s menší hodnotou teplotního součinitele délkové roztažnosti α_2 pak vrstva pasivní. Předpokládá se, že při teplotě okolí T_1 mají obě vrstvy volného přímého bimetalového pásku stejnou délku $L_1 = L_2 = L$ (Obr. 1 a). Při ohřevu bimetalu (v elektrických přístrojích Jouleovými ztrátami) na teplotu $T_2 > T_1$ se pro fiktivní případ oddělených vrstev (Obr. 1 b) každá vrstva prodlouží o jinou délku ΔL .

$$\Delta L_i = L \alpha_i (T_2 - T_1) = l \alpha_i \Delta T \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Jelikož prodloužení aktivní vrstvy je větší než prodloužení pasivní vrstvy ($\Delta L_1 > \Delta L_2$), dochází v případě vzájemného pevného spojení obou vrstev (Obr. 1 c) ke vzniku vnitřního napětí a následně k deformaci sestavy. Při rovnoměrném oteplení bimetalu vzniká v delší aktivní vrstvě namáhání tlakem – silami F_1 (kratší pasivní vrstva brání jejímu roztažení na plnou délku $L + \Delta L_1$, odpovídající teplotě T_2) a v kratší pasivní vrstvě vzniká namáhání tahem – silami F_2 (delší aktivní vrstva se ji snaží natáhnout). Výsledkem je vznik ohybu bimetalového pásku v podélné i příčné ose, přičemž střed ohybu je na straně pasivní vrstvy s menší hodnotou teplotního součinitele délkové roztažnosti α_2 . [4]

Z výše uvedeného plyne základní vlastnost bimetalu – schopnost měnit s rostoucí teplotou tvar. Toho se využívá k automatickému ovládání a řízení různých teplotně závislých zařízení (např. elektromechanický termostat, termostatický ventil, atd.). V oblasti elektrických spínacích přístrojů se jedná zejména o spouště s jistící činností. Jestliže totiž brání bimetalu v jeho přirozené deformaci nějaká překážka (západka volnoběžky jističe), tedy síla opačného smyslu než mají vnitřní síly vyvolávající deformaci, mají tyto vnitřní síly (pokud jsou větší) možnost konat na dráze průhybu práci, uvolnit západku volnoběžky spínacího mechanismu a tím způsobit vypnutí jistícího přístroje. V případě, že je bimetal pevně ukotven jedním koncem, koná při tepelném průhybu žádanou práci jeho druhý konec. Bimetalový pásek může být ukotven také oboustranně, potom může konat práci jeho střední část, která přeskočí ze základní (na

jednu stranu) prohnuté polohy na druhou stranu. Takové provedení je velmi výhodné např. pro mžikové rozpínání obvodu. [4]



Obr. 1: Princip činnosti bimetalu

2.2 Materiály bimetalů

Aktivní vrstva může být zhotovena ze slitiny železa, ale i z neželezných kovů. Ojedinele lze použít i čisté železo. Jeho teplotní součinitel délkové roztažnosti je však poměrně nízký (cca $13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ při teplotách od 0°C do 300°C). Výrazně lepší vlastnosti vykazují speciální oceli s niklem (FeNiMo, FeNiMn) nebo chromem (kanthal - FeCrAl). Ze skupiny neželezných kovů lze na výrobu aktivní vrstvy použít nikl, hliníkový a beryliový bronz nebo slitiny mědi jako mosaz (CuZn), konstantan či monel (NiCu). Tyto materiály se vyznačují vysokými hodnotami teplotního součinitele délkové roztažnosti a dobrými mechanickými vlastnostmi.

Pasivní vrstva musí být zhotovena z materiálu s nízkou hodnotou teplotního součinitele délkové roztažnosti. Nejpoužívanějším materiálem pro pasivní vrstvu je proto slitina železo-nikl (FeNi) s obsahem niklu do cca 40 %. Nejpoužívanější slitinou této soustavy je invar, který obsahuje 36 % niklu a 64 % železa. Jeho teplotní součinitel délkové roztažnosti nepřesahuje hodnotu $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ při teplotě do 200°C . [4]

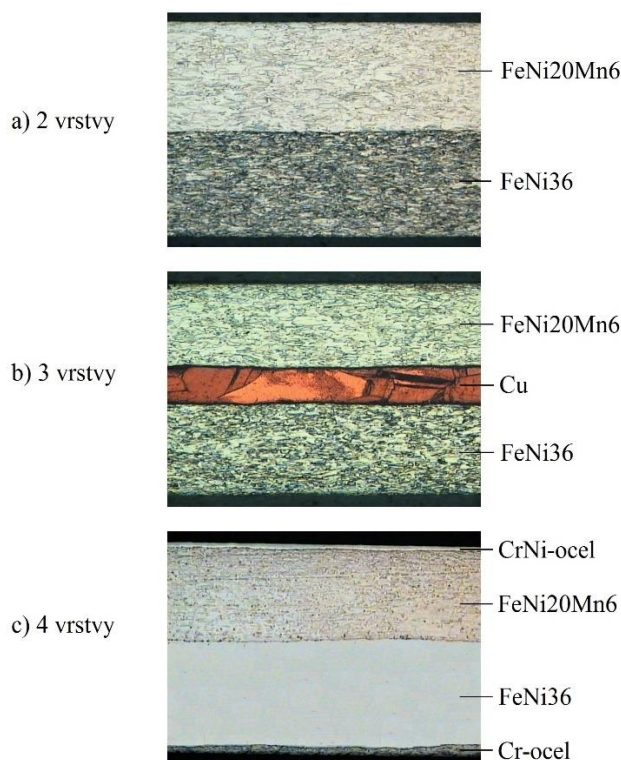
Hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti se však mění s teplotou. Citlivost bimetalu tedy závisí na pracovní teplotě, a proto jeho praktické použití přichází v úvahu jen v určitém rozmezí pracovních teplot. V závislosti na materiálu aktivní a pasivní vrstvy existují bimetaly různé citlivosti a vhodnosti pro různá rozmezí pracovní teploty. Bimetaly pro pracovní teploty do 200°C se tedy svým složením liší od bimetalů pro pracovní teploty do 400°C . Pro vyšší teploty se již bimetaly zpravidla nepoužívají z důvodu nepříjemného poklesu jejich mechanické pevnosti. Výrobci obvykle udávají u

jednotlivých typů bimetalu rozmezí teplot linearit jejich charakteristik, tj. rozmezí teplot stejnoměrné citlivosti bimetalu.

Volba materiálu jednotlivých vrstev bimetalu závisí především na konkrétním použití bimetalu a na požadavcích výroby a zpracování. Významnou roli zde však hraje také cena. Některé kovy (např. platina) mohou být z tohoto důvodu ihned vyloučeny.

Z hlediska použití bimetalu je výchozím bodem pro návrh dosažení odpovídajícího stupně jeho citlivosti v závislosti na výběru vhodných materiálů pro jednotlivé vrstvy. Se změnou teploty musí materiály bimetalů v závislosti na rozmezí pracovních teplot a velikosti průhybu splňovat další důležitá kritéria, jako je stálost mechanických vlastností a odolnost proti změně struktury. Významnou roli hraje také druh ohřevu bimetalu (přímý, nepřímý) a prostředí, ve kterém se bimetal nachází.

Z hlediska výroby a zpracování je pro celý výrobní proces bimetalu (tepelné zpracování, válcování, ohýbání atd.) velmi důležité, aby vlastnosti jeho jednotlivých vrstev (zejména teplota tání a modul pružnosti v tahu) nebyly příliš odlišné. Materiály s výrazně odlišnými vlastnostmi nejsou pro výrobu bimetalu vhodné. Při použití některých kombinací kovů nebo slitin mohou nastat potíže se vznikem difúzní vrstvy mezi jednotlivými vrstvami bimetalu. Difúzní vrstva buď nevznikne vůbec (což brání spojení obou vrstev dohromady) nebo vznikne jen křehká slabá difúzní vrstva, která brání následnému zpracování (válcování, stříhání, ohýbání). Takové kombinace materiálů bez dalšího zvláštního zpracování nejsou pro výrobu bimetalu vhodné.



Obr. 2: Ukázka struktury bimetalu [1]

V průběhu času se pro dané použití bimetalu některé materiály ukázaly být vhodnější než ostatní. Základní typ bimetalu se skládá ze dvou vrstev (aktivní a pasivní - *Obr. 2 a*). Šířky těchto vrstev jsou obvykle v poměru 1:1 a jejich moduly pružnosti v tahu jsou podobné velikosti. To umožňuje pro příslušnou kombinaci materiálů získat maximální možný průhyb a zakřivení bimetalu. Mezi obě vrstvy bývá pro určité aplikace přidána měděná mezivrstva sloužící ke zlepšení elektrické či tepelné vodivosti (viz *Obr. 2 b*). V některých případech bývá na obou stranách bimetalu přidána ještě vrstva zajišťující korozivzdornost (*Obr. 2 c*). Přídavné vrstvy však zhoršují tepelnou citlivost bimetalu. [1] [2]

2.3 Parametry bimetalu nutné k návrhu

Požadavky, které musí bimetal splňovat, jsou dány jejich geometrickými a fyzikálními parametry, příslušnými tolerancemi a stálostí jejich vlastností. Pro návrh bimetalu jsou podle [1] a [2] důležité zejména tyto parametry:

- měrná tepelná křivost;
- měrný tepelný průhyb;
- maximální pracovní teplota;
- rozmezí linearity;
- modul pružnosti v tahu;
- měrný elektrický odpor;
- veličiny určující oteplení;
- maximální ohybové napětí;
- tvrdost podle Vickerse;
- odolnost vůči korozi.

Zásadní vliv na dodržení těchto parametrů má výroba bimetalu.

2.3.1 Měrná tepelná křivost

Měrná tepelná křivost je nejdůležitějším parametrem bimetalu. Jedná se o materiálovou vlastnost, která se v praxi nejspolehlivěji určuje experimentálně. Může však být určena také výpočtem za účelem dimenzování a optimalizace bimetalu. Pro základní typ bimetalu skládající se ze dvou vrstev je možné určit měrnou tepelnou křivost podle vztahu:

$$k = \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2) \left(1 + \frac{s_1}{s_2}\right)^2 \frac{s_1 E_1}{s_2 E_2}}{3 \left(1 + \frac{s_1}{s_2}\right)^2 \frac{s_1 E_1}{s_2 E_2} + \left(1 + \frac{s_1 E_1}{s_2 E_2}\right) \left(1 + \frac{s_1^3 E_1}{s_2^3 E_2}\right)} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (2)$$

kde	k	je	měrná tepelná křivost bimetalu [K^{-1}];
	α_1		teplotní součinitel délkové roztažnosti aktivní vrstvy [K^{-1}];
	α_2		teplotní součinitel délkové roztažnosti pasivní vrstvy [K^{-1}];
	E_1		modul pružnosti v tahu aktivní vrstvy [MPa];
	E_2		modul pružnosti v tahu pasivní vrstvy [MPa];
	s_1		tloušťka aktivní vrstvy [mm];
	s_2		tloušťka pasivní vrstvy [mm].

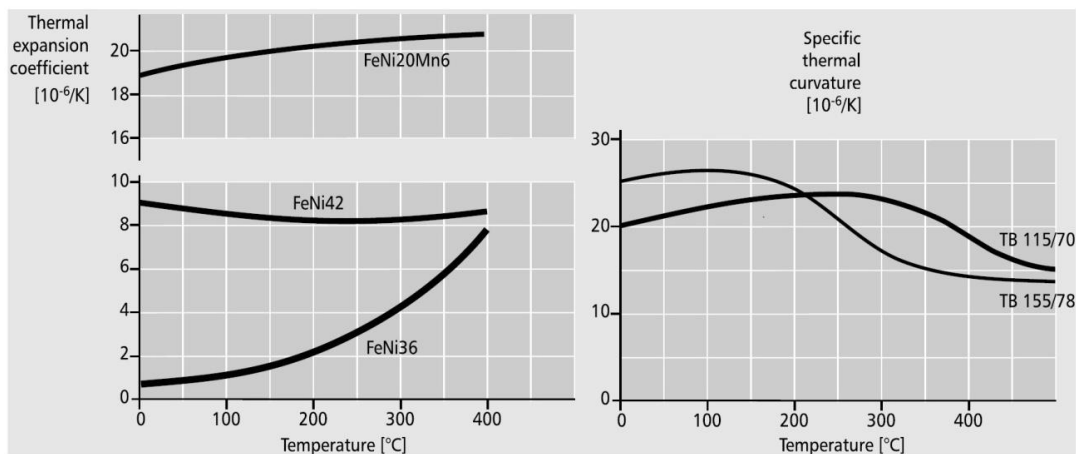
Měrná tepelná křivost je tedy funkcí teplotních součinitelů délkové roztažnosti, modulů pružnosti v tahu a tloušťky obou vrstev bimetalu. Za předpokladu, že rozdíl $(\alpha_1 - \alpha_2)$ je konstantní, dosahuje měrná tepelná křivost maximální hodnoty při poměru tloušťky aktivní a pasivní vrstvy:

$$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad [-] \quad (3)$$

Pokud měrná tepelná křivost bimetalu dosahuje maximální hodnoty na základě poměru tloušťky a modulů pružnosti v tahu obou vrstev podle vztahu (3), je možné rovnici (2) zjednodušit na tvar:

$$k = \frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2) \quad [K^{-1}] \quad (4)$$

Měrná tepelná křivost je pak úměrná pouze rozdílu teplotních součinitelů délkové roztažnosti obou vrstev.



Obr. 3: Příklad teplotní závislosti součinitele délkové roztažnosti a měrné tepelné křivosti [1]

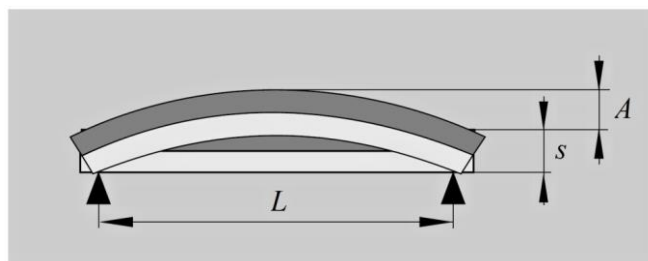
Protože však hodnota teplotního součinitele délkové roztažnosti závisí kromě materiálu také na teplotě (Obr. 3), lze vhodnou kombinací materiálů obou vrstev definovat funkční vlastnosti bimetalu. Měrná tepelná křivost se měří v teplotním rozsahu od 20 $^{\circ}C$ do 130 $^{\circ}C$. V tomto teplotním rozsahu je pro většinu typů bimetalu závislost měrné křivosti na teplotě přibližně lineárního charakteru. Pro výpočet průhybu určitého

typu bimetalu pracujícího v oblasti teplot částečně nebo zcela mimo rozsah linearity lze podle příslušné tabulky v [1] určit tzv. diferenční měrnou tepelnou křivost.

Za předpokladu, že bimetalový pásek je při počáteční teplotě T_1 rovný a že při teplotě T_2 dojde k určitému průhybu pásku, lze měrnou tepelnou křivost určit ze vztahu:

$$k = \frac{8s}{T_2 - T_1} \frac{A}{L^2 + 4A^2 + 4As} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (5)$$

kde A je vzdálenost mezi měřicími body při teplotě T_1 a T_2 $[\text{K}^{-1}]$;
 s tloušťka bimetalu ($s = s_1 + s_2$) $[\text{mm}]$;
 L aktivní délka bimetalu $[\text{mm}]$;
 T_1, T_2 počáteční a koncová teplota bimetalu ($T_2 > T_1$) $[\text{°C}]$.



Obr. 4: Zakřivení prostě podepřeného bimetalového nosníku [1]

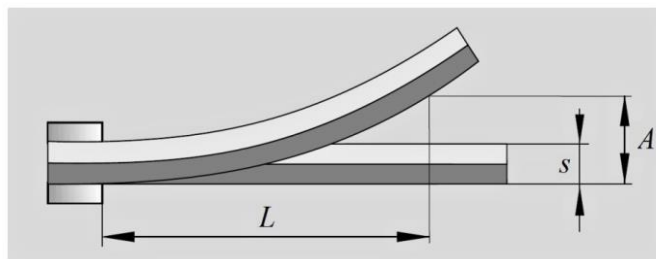
Hodnota měrné tepelné křivosti bývá v praxi nejčastěji vyjádřena v $[10^{-6} \text{ K}^{-1}]$, $[10^{-6}/\text{K}]$ nebo $[1/\text{MK}]$. [1][2]

2.3.2 Měrný tepelný průhyb

Měrný tepelný průhyb je materiálová vlastnost analogická k měrné tepelné křivosti. Dříve byl výrobcí uváděn jako katalogová hodnota. Byl určován experimentálně měřením výchylky jednostranně upevněného bimetalového pásku. Z důvodu vyhnutí se chybám a nejistotám měření způsobených mechanickým napětím v místě vetknutí pásku byl však měrný tepelný průhyb v katalozích výrobců nahrazen měrnou tepelnou křivostí. Při výpočtech bimetalu se však velmi často měrný tepelný průhyb stále používá. Jelikož je měrný tepelný průhyb 0,52 až 0,54 násobkem měrné tepelné křivosti, je možné pokládat výsledky výpočtu bimetalu pomocí tohoto přepočítávacího vztahu (6) za dostatečně přesné. [1][2]

$$a = 0,53k \quad [\text{K}^{-1}] \quad (6)$$

kde a je měrný tepelný průhyb bimetalu $[\text{K}^{-1}]$;
 k měrná tepelná křivost bimetalu $[\text{K}^{-1}]$.

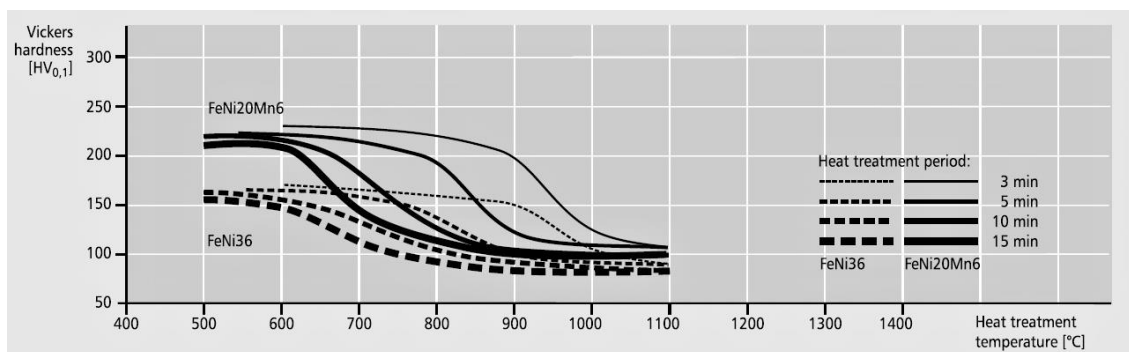


Obr. 5: Průhyb jednostranně upevněného bimetalového pásku [1]

2.3.3 Maximální pracovní teplota

Bimetalu mohou v zásadě pracovat v rozmezí teplot od hodnot blízkých se absolutní nule až po hodnoty několika set stupňů Celsia. V celém rozsahu pracovních teplot musí být zaručena dostatečná teplotní citlivost bimetalu, nesmí dojít ke změně struktury bimetalu a musí být zachována odolnost povrchu bimetalu proti vlivům prostředí (korozi). Rozsah pracovních teplot určuje maximální (a případně i minimální) pracovní teplota.

Maximální provozní teplota bimetalu je v podstatě dána teplotou, kdy dochází k rekrytalizaci materiálu jednotlivých vrstev. Při rekrytalizaci dochází k trvalým změnám materiálových vlastností bimetalu. Jednou z možných metod pro stanovení teploty rekrytalizace je měření tvrdosti materiálu podle Vickerse po jeho určitém předchozím tepelném zpracování. Na Obr. 6 jde vidět, že rekrytalizace nastává v okamžiku, kdy dochází k poklesu křivek tvrdosti.



Obr. 6: Tvrdost podle Vickerse jako funkce teploty [1]

Rekrytalizace a následné změkčení materiálu má zásadní vliv na velikost síly, kterou je bimetal schopen vyvíjet. Pokud se v konkrétní oblasti použití nevyžaduje silové působení vyvíjené bimetalem, nebo se požaduje jen malé silové působení, je možné bimetal používat i při vyšší teplotě než je teplota rekrytalizace. V takovém případě však musí být zaručeno, že bimetal stále dosahuje dostatečné hodnoty teplotní citlivosti a není trvale deformován vlivem průhybu či zakřivení.

Maximální pracovní teplotu celého bimetalu určuje maximální pracovní teplota materiálu aktivní a pasivní vrstvy, ale i materiálu všech přídavných vrstev. Bimetalu

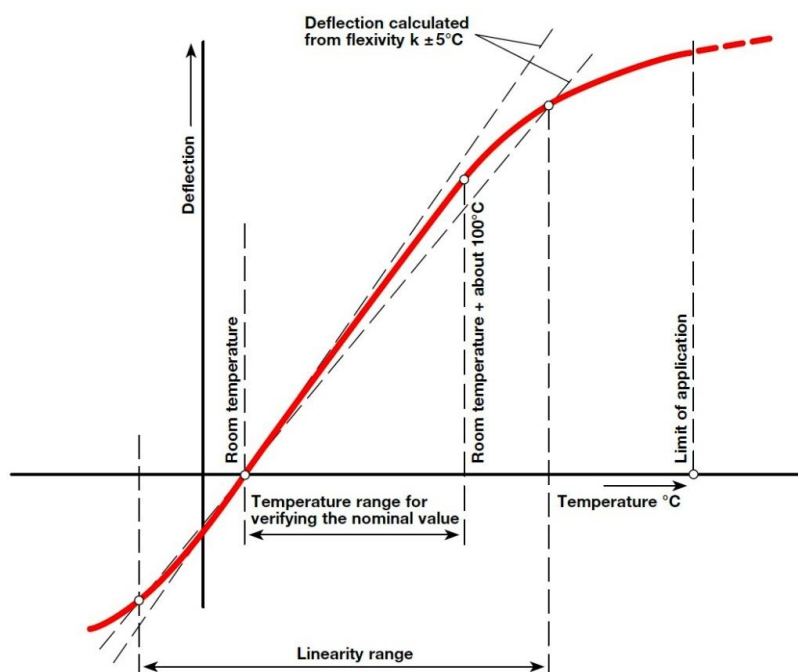
s přidavnou mezilehlou měděnou vrstvou proto mají poměrně nízkou hodnotu maximální pracovní teploty.

Pokud dochází v případě některých typů bimetalů k trvalé deformaci a nevratné změně struktury jednotlivých vrstev i při nízkých teplotách, mají takové bimetalové definovanu také minimální pracovní teplotu. Většinu typů bimetalu lze používat při teplotách až do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1][2]

2.3.4 Rozmezí linearity

Každý bimetal má kromě rozsahu pracovních teplot definován také rozsah teplot, ve kterém je požadována konstantní hodnota jeho teplotní citlivosti. Tento teplotní rozsah je dán teplotními součiniteli délkové roztažnosti jednotlivých vrstev bimetalu. Například teplotní roztažnost slitiny FeNi36 (invaru) je v rozmezí teplot od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ velmi nízká, avšak při teplotách vyšších než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ prudce roste. Pokud bude pasivní vrstva bimetalu vyrobena z této slitiny, bude bimetal dosahovat vysoké hodnoty měrné tepelné křivosti při teplotách nižších než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho teplotní citlivost však začne klesat až při teplotách vyšších než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud má mít bimetal při vysokých teplotách přibližně konstantní teplotní citlivost, musí být aktivní vrstva zhotovena z materiálu s velmi vysokou hodnotou tepelné roztažnosti. Přitom však dojde ke snížení teplotní citlivosti bimetalu.

Dle normy DIN 1715 je rozmezí linearity definováno jako rozsah teplot, ve kterém se hodnota tepelného průhybu bimetalu neliší o více než $\pm 5\%$ od hodnoty vypočtené pomocí měrné tepelné křivosti a tloušťky daného bimetalu (viz Obr. 7). Rozmezí linearity je tedy rozsahem teplot, ve kterém lze nejlépe využít průhybu bimetalu. [1][2]



Obr. 7: Rozmezí linearity [2]

2.3.5 Modul pružnosti v tahu

Parametrem nezbytným pro výpočet a návrh bimetalu je modul pružnosti v tahu. Pokud v určité oblasti použití není vyžadována velká přesnost výpočtu a pokud jsou tloušťky a moduly pružnosti obou vrstev přibližně stejné ($s_1 \cong s_2$; $E_1 \cong E_2$), lze modul pružnosti základního typu bimetalu o dvou vrstvách snadno určit podle vztahu:

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

V případě, že nejsou splněny výše uvedené podmínky, platí pro modul pružnosti bimetalu vztah:

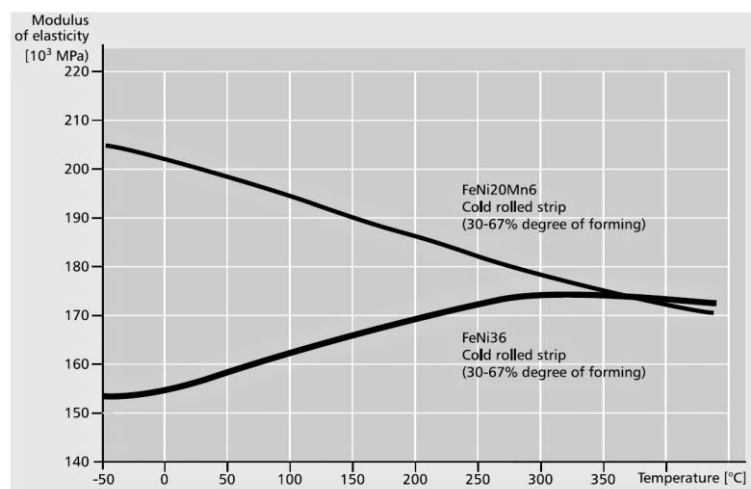
$$E = E_1 \frac{(1 - m^2 n)^2 + 4mn(1 + m)^2}{n(1 + mn)(1 + m)^3} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

kde $m = \frac{s_1}{s_2}$; $n = \frac{E_1}{E_2}$.

Pro bimetalu s maximální teplotní citlivostí lze rovnici (8) zjednodušit na tvar:

$$E = \frac{4E_1 E_2}{(\sqrt{E_1} + \sqrt{E_2})^2} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

Modul pružnosti je mírně teplotně závislý. Pokud je bimetal vyroben z kombinace slitin MnNiCu a FeNi, je jeho modul pružnosti prakticky nezávislý na teplotě. V případě kombinace slitiny FeNiMn (nebo FeNiCr) se slitinou FeNi, dochází při maximální provozní teplotě k poklesu modulu pružnosti bimetalu o cca 10 % vůči minimální provozní teplotě. Důvodem této mírné teplotní závislosti je fakt, že se zvyšující se teplotou modul pružnosti pasivní vrstvy roste, zatímco modul pružnosti aktivní vrstvy klesá, jak jde vidět na Obr. 8. Při výpočtu a návrhu bimetalu se vzhledem k určitým předpokladům a zjednodušením pracuje s hodnotou modulu pružnosti uváděnou při pokojové teplotě (cca 20 °C). [1][2]



Obr. 8: Teplotní závislost modulu pružnosti v tahu pro slitiny FeNi20Mn6 a FeNi36 [1]

2.3.6 Měrný elektrický odpor

Princip činnosti bimetalu je založen na působení tepla. Toto teplo může být vyvinuto přímo v bimetalu, kdy přes něj prochází elektrický proud, nebo může teplo do bimetalu přestupovat z okolí vedením, prouděním nebo zářením.

V praxi se obvykle pro různé hodnoty vypínacího proudu používají podobné konstrukce přístrojů. Předpokládá se tedy i přibližně stejný tvar bimetalu s přibližně stejným průhybem. Požadovaný průhyb bimetalu lze pomocí jeho rozměrů, hodnoty vypínacího proudu (při přímém ohřevu) a měrného elektrického odporu určit ze vztahu:

$$A = \frac{0,53k\rho L^2 I^2 t}{s^3 b^2 \gamma c} \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

kde	A	je	požadovaný průhyb bimetalu [mm];
	k		měrná tepelná křivost bimetalu [K^{-1}];
	ρ		měrný elektrický odpor bimetalu [$\mu\Omega\text{m}$];
	L		délka bimetalu [mm];
	I		efektivní hodnota elektrického proudu [A];
	t		doba ohřevu bimetalu [s];
	s		tloušťka bimetalu ($s = s_1 + s_2$) [mm];
	b		šířka bimetalu [mm];
	γ		hustota bimetalu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$];
	c		měrná tepelná kapacita bimetalu [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

Velikost elektrického odporu bimetalu lze při výrobě definovat poměrem tloušťky aktivní a pasivní vrstvy, ale také přidáním dalších vrstev určité šířky (měděná mezivrstva a krycí vrstvy sloužící pro odolnost vůči korozi). Výpočet elektrického odporu třívrstvého bimetalu je analogický výpočtu elektrického odporu tří rezistorů zapojených paralelně, tedy:

$$\frac{100}{\rho} = \frac{s_1}{\rho_1} + \frac{s_2}{\rho_2} + \frac{s_3}{\rho_3} \quad [\mu\Omega \cdot \text{m}] \quad (11)$$

kde	ρ	je	měrný elektrický odpor bimetalu [$\mu\Omega \cdot \text{m}$];
	ρ_1, ρ_2, ρ_3		měrný elektrický odpor jednotlivých vrstev [$\mu\Omega \cdot \text{m}$];
	s_1, s_2, s_3		tloušťka jednotlivých vrstev jako procentuální hodnota vůči celkové tloušťce bimetalu [%].

Elektrický odpor bimetalu je důležitým parametrem zejména u přímo vytápěného bimetalu a je v praxi určován měřením elektrického odporu bimetalového pásku při teplotě 20 °C. Měrný elektrický odpor je pak dán vztahem:

$$\rho = \frac{Rsb}{L} \quad [\mu\Omega \cdot \text{m}] \quad (12)$$

kde	ρ	je	měrný elektrický odpor bimetalu [$\mu\Omega\text{m}$];
	R		elektrický odpor bimetalu [Ω];
	s		tloušťka bimetalu [mm];
	b		šířka bimetalu [mm];
	L		délka bimetalu [mm].

Elektrický odpor je veličina závislá na teplotě. Se zvyšující se teplotou roste i hodnota elektrického odporu. Při výpočtu je pro zjednodušení uvažována lineární závislost elektrického odporu na teplotě podle vztahu:

$$\rho_2 = \rho_1[1 + \varepsilon(T_2 - T_1)] \quad [\mu\Omega \cdot \text{m}] \quad (13)$$

kde	ρ_1	je	měrný elektrický odpor bimetalu při teplotě T_1 [$\mu\Omega \cdot \text{m}$];
	ρ_2		měrný elektrický odpor bimetalu při teplotě T_2 [$\mu\Omega \cdot \text{m}$];
	T_1		počáteční teplota bimetalu [$^{\circ}\text{C}$];
	T_2		konečná teplota bimetalu [$^{\circ}\text{C}$];
	ε		teplotní součinitel elektrického odporu [K^{-1}].

2.3.7 Veličiny určující oteplení

Měrná tepelná kapacita

Důležitým parametrem pro výpočet přímo i nepřímo vytápěného bimetalu je jeho měrná tepelná kapacita. Jedná se o charakteristickou vlastnost materiálu. Hodnota měrné tepelné kapacity je závislá na teplotě. Při pokojové teplotě (cca 20°C) se u většiny typů bimetalu pohybuje v rozmezí $0,39$ až $0,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Ačkoliv se v praxi pro termodynamické výpočty běžně používá střední měrná tepelná kapacita c_m , lze (za jistých zjednodušujících předpokladů souvisejících s tepelnou výměnou) pro výpočet elektricky vytápěných bimetalů použít měrnou tepelnou kapacitu při pokojové teplotě. Je to z toho důvodu, že teplotní závislost měrné tepelné kapacity bimetalu je přibližně lineárního charakteru, přičemž při maximální provozní teplotě dochází k poklesu měrné tepelné kapacity jen o cca 10 % vůči minimální provozní teplotě. [1][2]

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je charakteristickou vlastností materiálu. Určuje rychlost dosažení rovnoměrného rozložení teploty v celém bimetalu následkem změny teploty bez ohledu na druh ohřevu (přímý, nepřímý).

Přímo pro výpočet bimetalu se tato veličina nepoužívá. Slouží však k odhadu typu bimetalu pro konkrétní použití. Bimetal s přídavnou měděnou mezivrstvou je ve srovnání se základním typem bimetalu o dvou vrstvách mnohem lepším tepelným vodičem, jelikož měď má mnohem větší tepelnou vodivost než slitiny FeNi. Z toho důvodu se používá jako

bezpečnostní prvek v aplikacích s rychlou teplotní odezvou a v aplikacích, kde je nutné zabránit vzniku velkých teplotních špiček. [1][2]

Teplotní záření

Přestup tepla zářením lze chápat jako vzájemnou výměnu záření mezi dvěma povrchy. Množství přeneseného tepla závisí mimo jiné na součinitelích teplotního záření povrchů, mezi nimiž probíhá tepelná výměna. Čím větší je součinitel teplotního záření povrchu, tím lepší je přenos tepla.

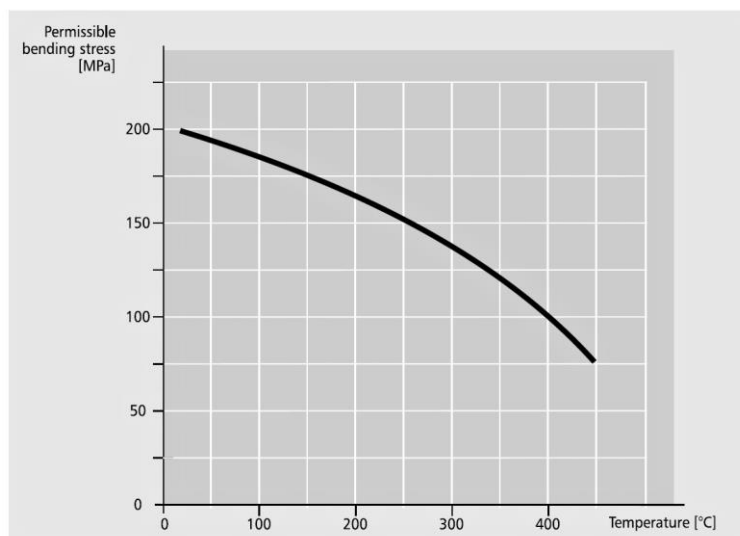
V určitých případech ohřevu bimetalu zářením je užitečné natřít jeho povrch na černo za účelem zvýšení jeho součinitele teplotního záření a tím dosažení účinnějšího přenosu tepla. [1][2]

2.3.8 Maximální ohybové napětí

Maximální ohybové napětí $\sigma_{\max}$ je důležitým parametrem pro výpočet síly vyvíjené bimetalem, například pro přímé působení na spínací mechanismus.

Maximální velikost vyvíjené síly je dána ohybovým napětím, při kterém ještě nedochází k plastické (trvalé) deformaci bimetalu. V případě překročení hodnoty maximálního ohybového napětí dochází k trvalé deformaci a narušení funkční geometrie bimetalového mechanismu, což brání jeho správné funkci. V praxi lze pro návrh bimetalu uvažovat napětí na mezi pružnosti, tj. napětí, při kterém dochází k trvalému, avšak zanedbatelně malému prodloužení nebo zkrácení bimetalu o 0,005 % původní délky. Do této meze se bimetal prakticky pružně deformuje.

Hodnota maximálního ohybového napětí je stejně jako většina ostatních parametrů závislá na teplotě, což je třeba brát při návrhu bimetalu v úvahu. Katalogová hodnota maximálního ohybového napětí bimetalu udávaná výrobcem je obvykle uváděna s dostatečnou rezervou. Přesnou hodnotu lze proto určit pouze experimentálně. [1][2]



Obr. 9: Příklad závislosti maximálního ohybového napětí na teplotě [1]

2.3.9 Tvrdost podle Vickerse

K dosažení dostatečné pružnosti pro konkrétní použití, jsou bimetaly tvářeny za studena s 20 až 50 % stupně. Pro určité hodnoty pružnosti bimetalu mohou být vyžadovány i vyšší stupně tváření za studena. Na základě zkušeností a odlišných pevnostních vlastností aktivní a pasivní vrstvy, je kritériem preferovaným pro výběr vhodného procesu ohýbání a stupně tváření tvrdost podle Vickerse. Je třeba mít na paměti, že pokud jsou na výrobu bimetalu použity vysoké stupně tváření, je maximální provozní teplota pro dané použití bimetalu nižší. [1][2]

2.3.10 Odolnost vůči korozi

Koroze je proces, kdy dochází ke škodlivým změnám v materiálu jednotlivých vrstev bimetalu vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím. Koroze vzniká na povrchu materiálu a pokračuje směrem dovnitř. Důsledkem je výrazné zhoršení mechanických vlastností bimetalu, což může vést k jeho snadnému mechanickému poškození (prasknutí, zlomení). Proto musí být bimetaly dostatečně odolné vůči korozi a to při nejrůznějších atmosférických podmínkách. [1][2]

Existují tři možné způsoby, jak zabránit (případně alespoň omezit) korozi bimetalu:

- přidání ochranné vrstvy zajišťující korozivzdornost na povrch aktivní i pasivní vrstvy
- galvanické pokovování obou vrstev pomocí niklu, mědi, kadmia, stříbra, zinku nebo cínu
- použití korozivzdorných slitin přímo na výrobu aktivní a pasivní vrstvy

2.4 Výpočet bimetalu

Při výpočtu bimetalového prvku je nutno brát ohled na:

- požadovaný průhyb
- působení vnějších sil
- maximální ohybové napětí
- optimální objem
- způsob výroby
- velikost prostoru pro uložení a práci

Exaktní výpočet bimetalových mechanismů je velmi obtížný, jelikož výpočet vnitřního napětí a z něj vyplývající deformace lze provést jen přibližně. Stejně tak časový průběh oteplování a rozložení teplot nelze dobře zachytit, proto ani tyto veličiny nejsou přesně známy. Poměry mezi oteplením, působícími silami a průhybem jsou proto v teoretických vztazích používaných pro výpočet bimetalu idealizovány. Odvozené teoretické vztahy byly experimentálně ověřovány a následně korigovány [4]. Přesto však

i výpočty jednoduchých mechanismů jsou poměrně složité a ve většině případů nelze analytickým výpočtem dosáhnout velkého stupně přesnosti. Například upnutí pevného konce bimetalového pásu může způsobit změny v geometrii. Výsledky výpočtu se mohou pouze přibližovat skutečným výsledkům. Z toho důvodu je třeba výsledky výpočtu vždy ověřovat měřením. [1][2]

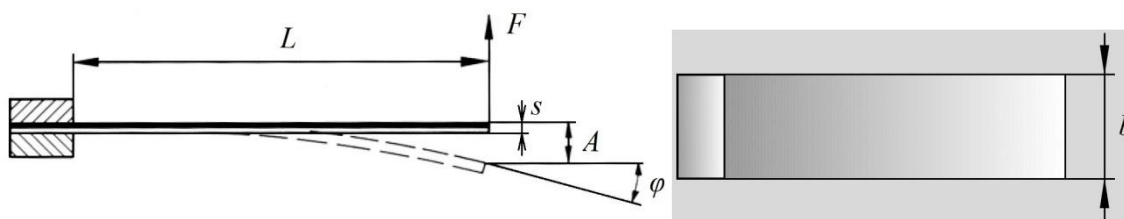
Ve spínacích přístrojích bývá bimetalový prvek nejčastěji tvořen přímým, jednostranně upevněným páskem obdélníkového, případně zkoseného (lichoběžníkového) tvaru. V této kapitole jsou proto uvedeny důležité výpočtové vztahy právě pro tyto dva případy. Uvedené vztahy z velké části shrnují známé rovnice a empiricky stanovené proměnné. Cílem kapitoly je poskytnout přehled užitečných matematických vztahů pro výpočet bimetalového prvku. Je zde záměrně upuštěno od vypisování kompletního odvození těchto vztahů.

Pro ostatní v praxi používaná řešení bimetalových prvků (pásek oboustranně upevněný, pásek zahnutý, pásek zkroucený do spirály či válcové šroubovice, kruhové desky, atd.) lze výpočtové vztahy nalézt v [1], [2] a [4].

Výchozí předpoklady pro výpočet bimetalu ve tvaru přímého štíhlého pásu jsou idealizovány následovně:

- Při teplotě okolí T_1 je pásek z homogenních materiálů přímý a proudem je ohříván rovnoměrně.
- Průhyb je vyvolán silami F_1 a F_2 , kterými je pásek natahován a stlačován a o nichž se předpokládá, že působí v těžištích průřezů pásů.
- Obdélníkový průřez pásu se nemění. Kulové zakřivení, které se ve skutečnosti vytváří, je vzhledem ke štíhlosti pásu zanedbáváno.

2.4.1 Jednostranně upevněný přímý pásek obdélníkového tvaru



Obr. 10: Definice rozměrů pro jednostranně upevněný přímý pásek obdélníkového tvaru [2]

Výpočtové vztahy pro pásek obdélníkového tvaru podle [1], [2] a [3]:

- Volný průhyb pásu při změně teploty a při respektování $a = 0,53k$

$$A_v = \frac{a(T_2 - T_1)L^2}{s} = \frac{0,53k(T_2 - T_1)L^2}{s} \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

- Průhyb při působení protisíly F_m vybavovacího mechanismu a při konstantní teplotě

$$A_m = \frac{4F_m L^3}{Ebs^3} \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

- Průhyb při působení protisíly F_m vybavovacího mechanismu a při změně teploty, určený ze vztahu (14) a (15)

$$A = A_v - A_m = \frac{a(T_2 - T_1)L^2}{s} - \frac{4F_m L^3}{Ebs^3} \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

- Úhel mezi pracovním koncem pásku a jeho původní přímkou polohou při změně teploty

$$\varphi = \frac{2a(T_2 - T_1)L}{s} \frac{360}{2\pi} \quad [^\circ] \quad (17)$$

- Síla vyvíjená páskem při částečně omezeném průhybu (vlivem působení protisíly mechanismu) a při konstantní teplotě

$$F_u = \frac{Ebs^3 A_u}{4L^3} \quad [\text{N}] \quad (18)$$

- Síla vyvíjená páskem při zcela omezeném průhybu (vlivem působení protisíly mechanismu), kdy je pásek fixován v původní poloze, a při změně teploty, určená pomocí vztahu (14) a (18)

$$F_o = \frac{Ebs^3}{4L^3} A_v = \frac{0,53kEbs^2(T_2 - T_1)}{4L} \quad [\text{N}] \quad (19)$$

- Aby byla dlouhodobě zajištěna správná funkce pásku, nesmí použité zatížení překročit hodnotu maximálního ohybového napětí

$$\sigma_{\max} = \frac{6F_{\max} L}{bs^2} \quad [\text{MPa}] \quad (20)$$

Odtud lze získat vztah pro maximální přípustnou sílu vyvíjenou páskem s ohledem na maximální ohybové napětí

$$F_{\max} = \frac{\sigma_{\max} bs^2}{6L} \quad [\text{N}] \quad (21)$$

- S ohledem na průhyb a sílu vyvíjenou páskem, je třeba rozlišovat poměr celkového oteplení použitého na průhyb T_A a poměr celkového oteplení použitého na vyvinutí síly (napětí) T_F

$$T_2 - T_1 = \Delta T = T_A + T_F \quad [\text{K}] \quad (22)$$

Ze vztahu (14) plyne

$$T_A = \frac{As}{0,53kL^2} \quad [K] \quad (23)$$

Ze vztahu (19) plyne

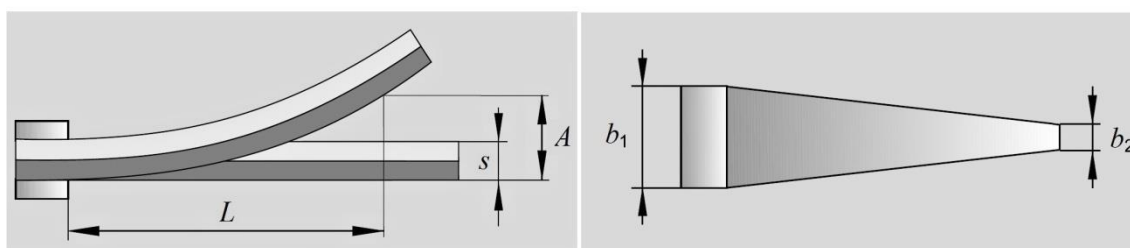
$$T_F = \frac{4FL}{0,53kEbs^2} \quad [K] \quad (24)$$

Za předpokladu, že oteplení použité na průhyb je rovné oteplení použitému na vyvinutí síly (tedy $T_A = T_F = 0,5\Delta T$), lze pomocí vztahů (14) a (19) teoreticky určit minimální možný objem pásku pro vykonání požadované práce:

$$V_{\min} = \frac{16FA}{a^2E\Delta T^2} = \frac{16FA}{0,281k^2E\Delta T^2} \quad [mm^3] \quad (25)$$

V praxi však může být pro určitá konstrukční řešení vyžadován rozdílný poměr oteplení použitého na průhyb a na vyvinutou sílu pásku ($T_A \neq T_F$). V takovém případě lze pro požadovaný poměr $T_A : T_F$ (který definuje rozdělení vykonané práce mezi průhybem a vyvinutou silou) určit minimální objem pásku podle příslušné tabulky v [1].

2.4.2 Jednostranně upevněný přímý pásek zkoseného tvaru



Obr. 11: Definice rozměrů pro jednostranně upevněný přímý pásek zkoseného tvaru [1]

Při výpočtu přímého pásku zkoseného (lichoběžníkového) tvaru se vychází z výpočtu přímého (obdélníkového) pásku. Síla vyvinutá páskem je úměrná jeho šířce. V případě, že je poměr $b_2/b_1 < 1$, lze při konstantním poměru $F/\Delta T$ dosáhnout menšího objemu pásku než umožňuje přímý obdélníkový pásek. [1]

Výpočtové vztahy pro pásek zkoseného tvaru podle [1]:

- Pro výpočet je zaveden součinitel

$$\Psi = \frac{2(1-n)^3}{n^2 \left[3 + 4,605 \log \left(\frac{1}{n} \right) \right] - 4n + 1} \quad [-] \quad (26)$$

kde

$$n = \frac{b_2}{b_1} \quad [-] \quad (27)$$

$$\text{pro } b = b_1 = b_2 \text{ je } \psi = 3 \quad [-] \quad (28)$$

- Volný průhyb pásku při změně teploty a při respektování $a = 0,53k$

$$A_v = \frac{a(T_2 - T_1)L^2}{s} = \frac{0,53k(T_2 - T_1)L^2}{s} \quad [\text{mm}] \quad (29)$$

- Průhyb při působení protisíly F_m vybavovacího mechanismu a při konstantní teplotě

$$A_m = \frac{12F_m L^3}{Eb_1 s^3 \Psi} \quad [\text{mm}] \quad (30)$$

- Průhyb při působení protisíly F_m vybavovacího mechanismu a při změně teploty určený ze vztahu (29) a (30)

$$A = A_v - A_m = \frac{a(T_2 - T_1)L^2}{s} - \frac{12F_m L^3}{Eb_1 s^3 \Psi} \quad [\text{mm}] \quad (31)$$

- Síla vyvíjená páskem při částečně omezeném průhybu (vlivem působení protisíly mechanismu), a při konstantní teplotě, určená pomocí vztahu (18) a (28)

$$F_u = \frac{Eb_1 s^3 \Psi A_u}{12L^3} \quad [\text{N}] \quad (32)$$

- Síla vyvíjená páskem při zcela omezeném průhybu (vlivem působení protisíly mechanismu), kdy je pásek fixován v původní poloze, a při změně teploty, určená pomocí vztahu (19) a (28)

$$F_o = \frac{Eb_1 s^3 \Psi}{12L^3} A_v = \frac{0,53kEb_1 s^2 \Psi (T_2 - T_1)}{12L} \quad [\text{N}] \quad (33)$$

- Aby byla dlouhodobě zajištěna správná funkce pásku, nesmí použité zatížení překročit hodnotu maximálního ohybového napětí

$$\sigma_{\max} = \frac{6F_{\max} L}{b_1 s^2} \quad [\text{MPa}] \quad (34)$$

Odtud lze získat vztah pro maximální přípustnou sílu vyvíjenou páskem s ohledem na maximální ohybové napětí

$$F_{\max} = \frac{\sigma_{\max} b_1 s^2}{6L} \quad [\text{N}] \quad (35)$$

- S ohledem na průhyb a sílu vyvíjenou páskem, je třeba rozlišovat poměr celkového oteplení použitého na průhyb T_A a poměr celkového oteplení použitého na vyvinutí síly (napětí) T_F

$$T_2 - T_1 = \Delta T = T_A + T_F \quad [\text{K}] \quad (36)$$

Za předpokladu, že oteplení použité na průhyb je rovné oteplení použitému na vyvinutí síly (tedy $T_A = T_F = 0,5\Delta T$), lze pomocí vztahů (19) a (33) teoreticky určit minimální možný objem pásku pro vykonání požadované práce:

$$\frac{F}{T_F} = \frac{0,53kEbs^2}{4L} = \frac{0,53kEb_1s^2\Psi}{12L} \quad [\text{N/K}] \quad (37)$$

$$\frac{b}{4} = \frac{b_1\Psi}{12} \quad \Psi = 2 \quad b_1 = 1,5b \quad [\text{mm}] \quad (38)$$

$$V = 0,5(b_1 + b_2)Ls = 0,5 \cdot 1,5bLs = 0,75bLs \quad [\text{mm}^3] \quad (39)$$

Ze vztahu (39) jde vidět, že objem zkoseného pásku dosahuje 75 % objemu obdélníkového pásku. Zkosený tvar umožňuje vhodně dimenzovat šířku pásku v místě vetknutí bez ohledu na šířku pracovního konce pásku. Z toho důvodu se pásek tohoto tvaru doporučuje použít tam, kde by při použití obdélníkového tvaru došlo k překročení maximálního ohybového napětí. [1]

2.4.3 Přímo vytápěný bimetal

Výpočet oteplení bimetalu vyhřívaného jím přímo procházejícím proudem je prakticky stejný jako výpočet oteplení obyčejného elektrického vodiče protékaného proudem. Vztah mezi teplem v bimetalu vznikajícím, teplem v bimetalu akumulovaným (zvyšujícím jeho teplotu) a teplem z bimetalu odvedeným do okolí ochlazováním povrchu určuje rovnice tepelné rovnováhy:

$$RI^2dt = c_vVdT + \alpha_0P\Delta Tdt \quad [\text{J}] \quad (40)$$

kde	RI^2dt	je	teplo vznikající v bimetalu (Jouleovy ztráty) [J];
	$c_vVd(\Delta T)$		teplo akumulované v bimetalu [J];
	$\alpha_0P\Delta Tdt$		teplo odváděné do okolí povrchem bimetalu [J];
	R		odpor bimetalu [Ω];
	I		efektivní hodnota proudu procházejícího bimetalem [A];
	t		doba průchodu proudu bimetalem [s];
	α_0		měrná chladihost povrchu bimetalu [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$];
	P		ochlazovací povrch bimetalu [m^2];
	T		teplota bimetalu [K];
	ΔT		okamžité oteplení bimetalu [K];

c_V měrná objemová tepelná kapacita bimetalu [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$];
 V objem bimetalu [m^3].

Řešením rovnice tepelné rovnováhy (40) lze získat vztah pro okamžitou hodnotu oteplení bimetalu:

$$\Delta T = \frac{RI^2}{\alpha_0 P} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 Pt}{c_V V}} \right) = \Delta T_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad [\text{K}] \quad (41)$$

kde $\Delta T_{\max} = \frac{RI^2}{\alpha_0 P}$ je ustálené oteplení bimetalu [K];

$\tau = \frac{c_V V}{\alpha_0 P}$ časová oteplovací konstanta bimetalu [s^{-1}];

Pro výpočet oteplení bimetalového pásku protékaného proudem je rozhodující právě velikost časové oteplovací konstanty pásku, tj. doby, za kterou by bimetal dosáhl ustáleného oteplení, pokud by se z jeho povrchu neodvádělo žádné teplo.

$$\tau = \frac{c_V V}{\alpha_0 P} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (42)$$

Ze vztahu (41) vyplývá, že za dobu $t = \tau$ od začátku průchodu proudu dosáhne okamžité oteplení bimetalu hodnoty $\Delta T = 0,632 \Delta T_{\max}$.

Pro menší nadproudy vznikající při přetížení a trvající dobu delší než je časová oteplovací konstanta bimetalu ($t > 0,2\tau$) je nutné uvažovat odvod tepla do okolí ochlazováním povrchu. Okamžité oteplení pásku se v takovém případě určuje přímo podle vztahu (41):

$$\Delta T = \Delta T_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = \frac{RI^2}{\alpha_0 P} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 Pt}{c_V V}} \right) \quad [\text{K}] \quad (41)$$

Výpočet podle vztahu (41) však předpokládá idealizovanou podmínku (prakticky ale přípustnou), že časová oteplovací konstanta bimetalu je konstantní. Ve skutečnosti se ale měrná chladivost povrchu, měrná objemová tepelná kapacita a tím i časová oteplovací konstanta s oteplením mírně mění.

Pro větší nadproudy (zkratové proudy) trvající dobu výrazně kratší než je časová oteplovací konstanta bimetalu ($t < 0,2\tau$) lze zanedbat odvod tepla do okolí ochlazováním povrchu a považovat tak průběh oteplení za adiabatický děj ($\alpha_0 = 0$). Za této podmínky lze řešením rovnice tepelné rovnováhy (40) získat jednoduchý vztah pro okamžitou hodnotu oteplení bimetalu:

$$\Delta T = \frac{RI^2 t}{c_v V} \quad [K] \quad (43)$$

Protože pracovní oteplení pásku je obvykle dáno, je podle vztahu (43) počítána buď přípustná doba průtoku nadproudu dané velikosti, nebo pro danou velikost nadproudu a dobu jeho průtoku nutný průřez pásku. [2][4]

2.4.4 Nepřímo vytápěný bimetal

V některých přístrojích bývá teplo vyvinuté v samotném bimetalovém pásku tak malé, že nestačí k dosažení požadovaného průhybu pásku. V takovém případě se bimetal vytápí nepřímo např. pomocí topného vinutí, navinutého přes izolaci na pásek nebo pomocí topítka, které je k pásku ze strany přiloženo. Topítko je tvořeno topným páskem s definovaným odporem. Teplo přechází z topného vinutí přes izolaci nebo topítka do bimetalu vedením, případně prouděním a zářením. Z toho důvodu je výpočet nepřímo vytápěného pásku mnohem komplikovanější než výpočet pásku vytápěného přímo.

V případě nepřímého vytápění pomocí topného vinutí navinutého přes izolaci na pásek se teplo vznikající ve vinutí spotřebovává na zvýšení teploty samotného vinutí, na teplo odvedené z povrchu vinutí do okolí a na vlastní ohřev pásku. Rovnice tepelné rovnováhy (40) pak přechází do tvaru:

$$RI^2 dt = c_{v1} V_1 dT + \alpha_{01} P_1 \Delta T_1 dt + Q_3 dt \quad [J] \quad (44)$$

kde $RI^2 dt$ je teplo vznikající v topném vinutí (Jouleovy ztráty) [J];
 $c_{v1} V_1 dT$ teplo akumulované v topném vinutí [J];
 $\alpha_{01} P_1 \Delta T_1 dt$ teplo odváděné do okolí povrchem topného vinutí [J];
 $Q_3 dt$ teplo vstupující z topného vinutí do izolace [J].

Z topného vinutí vstupuje do izolační vrstvy tepelný tok Q_3 . Ten z ní na druhé straně také vystupuje a vstupuje do pásku. Je vyvolán teplotním spádem na obou stranách izolace ($T_1 > T_2$):

$$Q_3 = \frac{T_1 - T_2}{R_{T3}} = \frac{\lambda_3}{\delta_3} S_3 (T_1 - T_2) \quad [J] \quad (45)$$

kde λ_3 je tepelná vodivost izolační vrstvy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$];
 δ_3 tloušťka izolační vrstvy [m];
 S_3 plocha izolační vrstvy [m^2].

Teplo vstupující do bimetalového pásku se pak z části spotřebuje na zvýšení jeho teploty a z části se ochlazovacím povrchem pásku odvede do okolí:

$$Q_3 dt = c_{v2} V_2 dT + \alpha_{02} P_2 \Delta T_2 dt \quad [J] \quad (46)$$

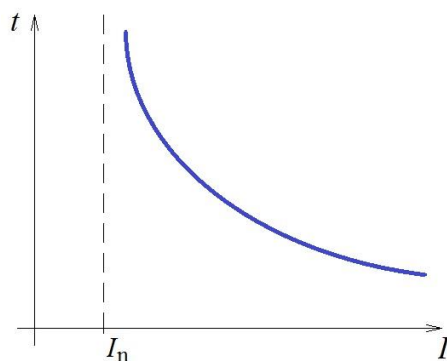
kde $Q_3 dt$ je teplo vstupující z izolace do bimetalu [J];
 $c_{v2} V_2 dT$ teplo akumulované v bimetalu [J];
 $\alpha_{02} P_2 \Delta T_2 dt$ teplo odváděné do okolí povrchem bimetalu [J].

Řešením diferenciálních rovnic (44) a (46) lze získat vztahy pro výpočet okamžitého oteplení v topném vinutí i v bimetalovém pásku. Tyto vztahy jsou uvedeny v [4].

2.5 Princip činnosti tepelné nadproudové spouště

Nadproudová spoušť je obecně hlavním funkčním prvkem samočinných mechanických spínacích přístrojů. Snímá a vyhodnocuje velikost proudu procházejícího přístrojem a v případě překročení určité hodnoty proudu, která je dána vypínací charakteristikou přístroje (resp. nadproudové spouště) dává za určitý definovaný čas pokyn k vybavení přístroje přímým působením mechanismu spouště na západku volnoběžky. Mechanismus spouště se uvádí do činnosti působením malé síly. Samotné vybavení na základě pokynu od nadproudové spouště má na starosti spínací systém.

Tepelná spoušť tvořená bimetalem ke své funkci využívá tepelných účinků proudu procházejícím přístrojem. Teplo je principem bimetalu přeměněno na sílu vybavující zámek nebo volnoběžku spínacího systému přístroje. Spoušť působí při menších nadproudech způsobených přetíženími. Jak jde vidět na *Obr. 12*, její vypínací charakteristika je časově závislá, tj. inverzní. Čím větší nadproud prochází jističem, tím kratší je čas jeho vypnutí. Značně se podobá vypínací charakteristice pojistky a je obvykle vhodnější pro jištění proti přetížení, protože spoušť má průběh bližší jištěnému zařízení.



Obr. 12: Tepelná (časově závislá) vypínací charakteristika

V některých spínacích přístrojích, zejména v jističích, tvoří tepelná (bimetalová) spoušť spolu se zkratovou (elektromagnetickou) spouští jeden celek - spoušť termomagnetickou. Ta se skládá ze základních prvků obou spouští, bimetalu i elektromagnetu. Proto je zde krátce popsán také princip zkratové spouště.

Samotná zkratová spoušť tvořená elektromagnetem ke své funkci využívá silových účinků proudu procházejícím jističem. Elektromagnetické pole vyvolané proudem je principem cívky přeměněno na sílu vybavující zámek nebo volnoběžku spínacího

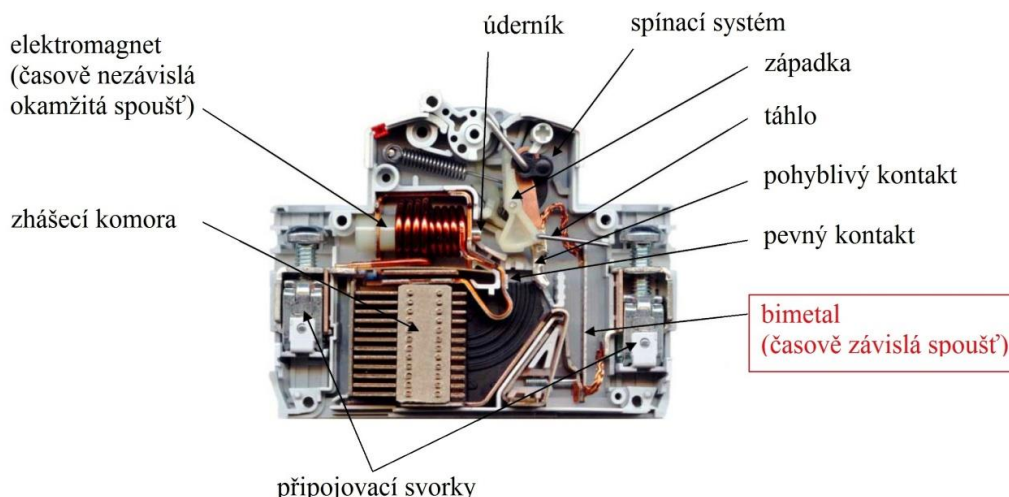
systému přístroje. Spoušť působí při větších nadproudech (zkratech). Její vypínací charakteristika je časově nezávislá. Od určitého nadproudu jistič vypíná ve stejném čase prakticky okamžitě.

V případě termomagnetické spouště jsou vypínací charakteristiky tepelné i zkratové spouště vzájemně sloučeny (*Obr. 19*). Jističe s termomagnetickou nadproudovou spouští tedy jistí proti přetížení (v oblasti menších nadproudů) i zkratu (v oblasti větších nadproudů). Protože zkratová spoušť působí od určitého nadproudu okamžitě a tepelná spoušť by stejný nadproud vypnula za delší dobu, nachází se na sloučené vypínací charakteristice jističe zlom obou charakteristik právě při hodnotě určitého nadproudu. Výhodou termomagnetických spouští je možnost použití jak ve střídavých, tak stejnosměrných rozvodech (na rozdíl od elektronických spouští, které lze vzhledem k detekci proudu pomocí proudových transformátorů použít jen ve střídavých rozvodech). [5][7]

2.6 Konstrukční řešení tepelných nadproudových spouští

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.4, ve spínacích přístrojích bývá bimetalový prvek nejčastěji tvořen přímým, jednostranně upevněným páskem určitého, např. obdélníkového či zkoseného (lichoběžníkového), tvaru. Je vyhříván buď jím přímo procházejícím proudem nebo nepřímě topným páskem (či vinutím) s definovaným odporem (topítkem), kterým je bimetal ovinut nebo je k němu ze strany přiložen. Další možností je kombinovaný ohřev bimetalu s využitím obou předchozích způsobů. Bimetal, případně bimetal s topítkem, tvoří základní konstrukční prvek tepelné spouště (časově závislé). Pokud nadproud určité velikosti prochází dostatečně dlouhou dobu, tuto závislost vyjadřuje časově závislá část vypínací charakteristiky daného jističe, bimetal se ohřeje a v důsledku toho prohne tak, že prostřednictvím mechanické vazby (lišty, táhla, páky atd.) dojde k uvolnění západky spínacího mechanismu. S využitím energie akumulované v pružinách spínacího systému dojde následně k samočinnému rozpojení silových kontaktů jističe.

Malé jističe používané pro domovní a podobné instalace (MCB) obvykle obsahují spoušť termomagnetickou, přičemž spouště tepelná a zkratová jsou konstrukčně odděleny, umístěny v různých částech jističe. Tyto jističe většinou nemají regulovatelnou tepelnou spoušť a k vybavení jejich mechanismu postačuje menší síla. Je zde proto realizováno přímé působení bimetalu na vybavovací mechanismus.

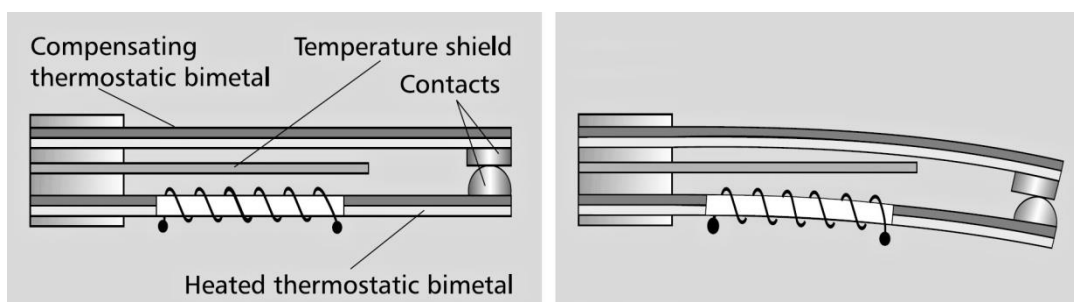


Obr. 13: Jistič s termomagnetickou nadproudovou spouští pro domovní instalace [5]

U spouštěčů motorů a kompaktních jističů (MCCB) určených pro všeobecné použití (jištění vedení, transformátorů, rozváděčů, elektromotorů, atd.), které obsahují termomagnetickou spoušť, tvoří tepelná i zkratová spoušť obvykle jeden celek, viz spoušť jističe Sentron 3VA12 od společnosti Siemens (Obr. 16). Konstrukční řešení termomagnetické nadproudové spouště tohoto jističe je popsáno v kapitole 3.1. [5] [7]

Tepelnou spoušť každého přístroje je třeba ve výrobě seřadit a nastavit tak správnou vybavovací polohu pracovního konce bimetalu podle aktuálních tolerancí. Pomocí seřizovacího šroubu je nastavena určitá definovaná vzdálenost mezi pracovním koncem bimetalu a vybavovacím mechanismem (lišťou). Prakticky je to provedeno tím způsobem, že jističem prochází definovaný násobek jmenovitého proudu po stanovenou dobu a následně je šroub dotažen, aby bimetal právě vybavil (přímo nebo nepřímo prostřednictvím lišty) západku spínacího mechanismu a tím aby došlo k vypnutí přístroje.

Při změně teploty okolí dochází ke změně průhybu bimetalu a tím i vypínací charakteristiky tepelné spouště. Aby při změně teploty okolí nedošlo ke změně vypínací charakteristiky, bývají některé přístroje (např. nadproudová relé) vybaveny navíc tzv. kompenzačním bimetalem (Obr. 14), který reaguje na teplotu okolí a kompenzuje ji. Je tepelně odstíněný od pracovního bimetalu a jeho vrstvy jsou vůči pracovnímu bimetalu převráceny. [1]



Obr. 14: Příklad kompenzace teploty okolí [1]

2.7 Meze vypínací charakteristiky tepelné nadproudové spouště

Vypínací charakteristika tepelné nadproudové spouště, tedy závislost celkové vypínací doby přístroje na velikosti procházejícího nadproudu, je obecně ohraničena mezemi stanovenými příslušnými normami ČSN. Tyto meze jsou obvykle stanoveny podle účelu použití přístroje. Pro praktické aplikace jsou důležité zejména meze ohraničující první bod vypínací charakteristiky. Těmi jsou:

- smluvený nevypínací proud I_{nt} , tedy proud, při kterém nesmí jistič vypnout do smluvené doby
- smluvený vypínací proud I_t , tedy proud, při kterém musí jistič vypnout do smluvené doby

Například meze vypínací charakteristiky kompaktních jističů jsou podle normy ČSN EN 60947-2 stanoveny pouze pro její první bod (Tab. 1) bez ohledu na to, zdali jsou jističe vybaveny termomagnetickou nebo elektronickou nadproudovou spouští. Další průběh vypínací charakteristiky zpravidla určuje výrobce přístroje podle přizpůsobení se jištěnému zařízení. [5]

Tab. 1: Meze vypínací charakteristiky kompaktních jističů podle ČSN EN 60947-2 [5]

jmenovitý proud jističe	smluvená doba	smluvený nevypínací proud I_{nt}	smluvený vypínací proud I_t
$I_n \leq 63 \text{ A}$	1 h	1,05 násobek proudového nastavení	1,3 násobek proudového nastavení
$63 \text{ A} < I_n$	2 h		

Meze vypínací charakteristiky tepelné spouště jističů pro domovní a podobné instalace jsou uvedeny v normě ČSN EN 60898-1.

V případě tepelných nadproudových relé a spouštěčů motoru jsou stanoveny meze prvního bodu vypínací charakteristiky v závislosti na počtu napájených pólů, zdali je spoušť citlivá na ztrátu fáze a zdali je teplotně kompenzovaná. Dále je stanoven rozsah vypínací doby pro 1,5 a 7,2 násobek jmenovitého proudu přístroje, v závislosti na jeho třídě vybavení. Stanovené meze pro tyto přístroje jsou uvedeny v předmětové normě ČSN EN 60947-4-1. [5]

3 ANALYTICKÝ NÁVRH BIMETALOVÉ SPOUŠTĚ

Analytický návrh je proveden pro bimetal použitý v termomagnetické nadproudové spoušti kompaktního jističe Sentron 3VA1225-4EF32-0AA0 (dále jen 3VA12) od společnosti Siemens.

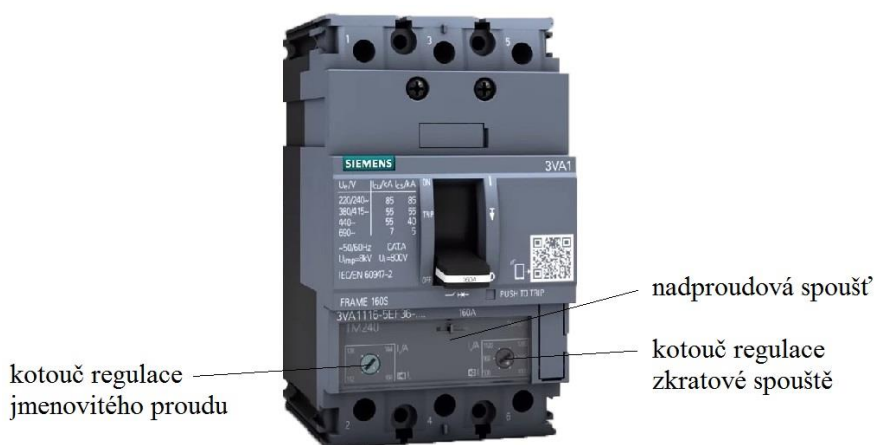
Předmětem analytického návrhu je teoretické určení:

- volného průhybu pásku v závislosti na oteplení
- síly vyvíjené páskem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu
- síly vyvíjené páskem v závislosti na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě
- průhybu pásku v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

Výpočet je proveden na základě výpočetních vztahů uvedených v kapitole 2.4.2.

3.1 Nadproudová spoušť v kompaktním jističi Sentron 3VA12

Kompaktní jistič 3VA12 je modulární, vysoce variabilní přístroj produktové řady Sentron od společnosti Siemens, určený zejména k jištění vedení proti přetížení i zkratu. Základní parametry jističe jsou uvedeny v Tab. 2. Jistič je vybaven termomagnetickou nadproudovou spouští TM240, která tvoří samostatný vyměnitelný blok (Obr. 16). V něm jsou zapouzdřeny základní prvky termomagnetické spouště, tedy bimetalový pásek s elektromagnetem v každém pólu. [6]

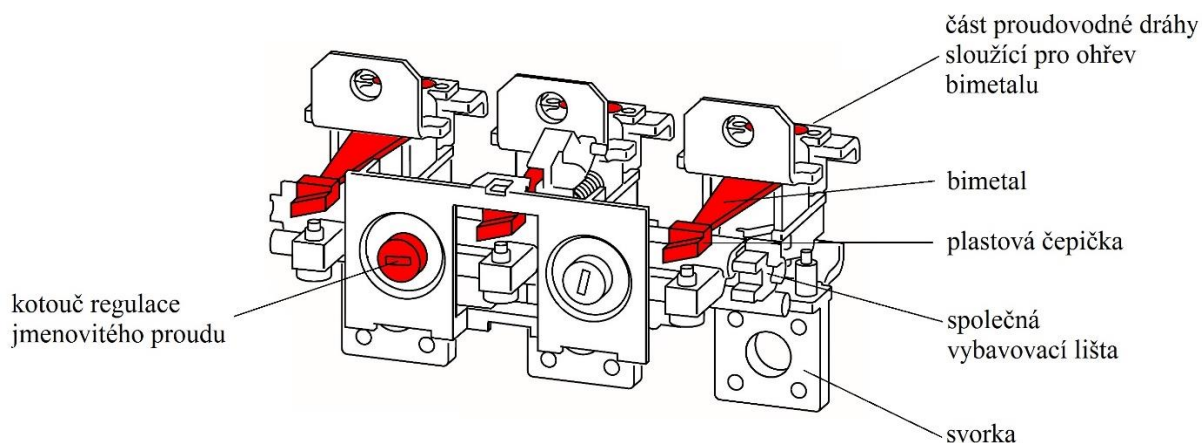


Obr. 15: Kompaktní jistič Sentron 3VA12 [6]

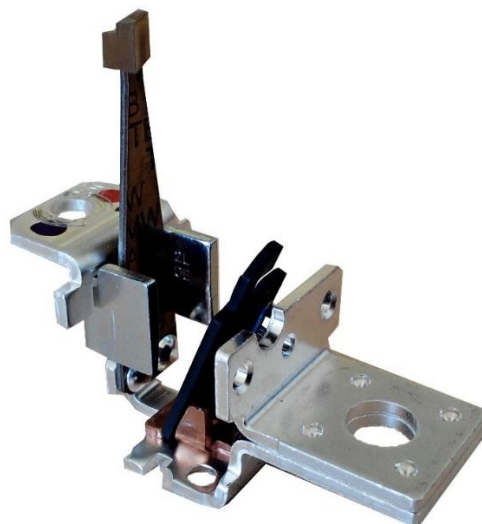
Tab. 2: Parametry kompaktního jističe Sentron 3VA12 [6]

počet pólů	3
jmenovitý proud I_n	250 A
jmenovité pracovní napětí U_e	690 V a.c.
jmenovitý kmitočet f_n	50/60 Hz
jmenovité impulsní výdržné napětí U_{imp}	8 kV
kategorie užití (selektivita)	A
jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost I_{cu} při U_e	7 kA při 690 V (AC) 36 kA při 380/415 V (AC) 55 kA při 220/240 V (AC)
jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost I_{cs} při U_e	5 kA při 690 V (AC) 36 kA při 380/415 V (AC) 55 kA při 220/240 V (AC)
referenční teplota okolí	50 °C

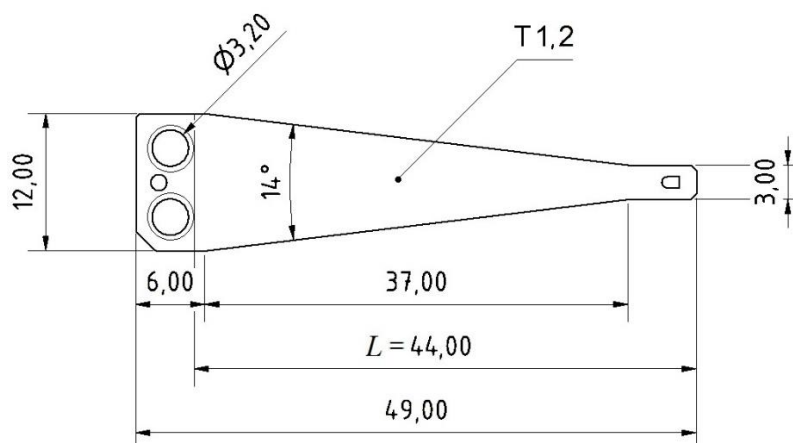
V tepelné spoušti každého pólu je použit přímý jednostranně upevněný bimetalový pásek TB 185/08 zkoseného (lichoběžníkového) tvaru s měděnou mezivrstvou od společnosti Auerhammer Metallwerk GmbH (Obr. 18). Je vyhříván nepřímo paralelně vedoucí částí proudovodné dráhy, ke které je přinýtován. Pokud nadproud určité velikosti prochází dostatečně dlouhou dobu, bimetal se ohřeje a v důsledku toho prohne tak, že prostřednictvím mechanické vazby (lišty) dojde k uvolnění západky spínacího mechanismu. Parametry bimetalu jsou uvedeny v Tab. 3. Elektromagnet zkratové spouště tohoto jističe tvoří jho a kotva oddalovaná od jha pružinou. Vinutí elektromagnetu je tvořeno jedním průvlekem magnetickým obvodem, a to částí proudovodné dráhy s paralelně připojeným bimetalem. Tepelné i zkratové spouště jednotlivých pólů jističe jsou mechanicky spřaženy společnými lištami, které uvolňují zámek (volnoběžku) vybavovacího mechanismu přístroje. Jedná se tedy o nepřímé působení bimetalu na vybavovací mechanismus přes vybavovací lištu. [6]



Obr. 16: Termomagnetická nadproudová spoušť TM240 v jističi Sentron 3VA12 [6]



Obr. 17: Jeden pól termomagnetické nadproudové spouště TM240

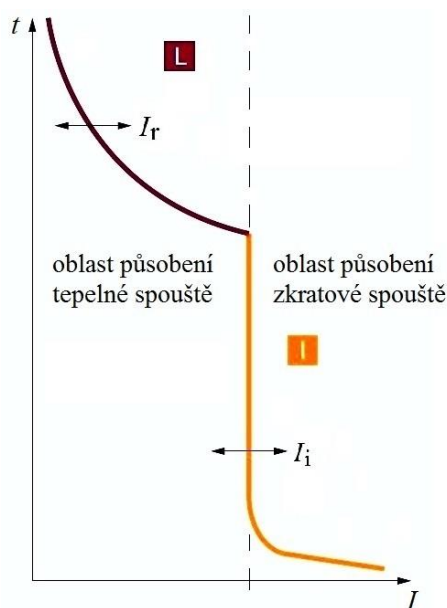


Obr. 18: Základní geometrie bimetalu TB 185/08 obsaženého v nadproudové spoušti TM240

Tab. 3: Parametry bimetalu TB 185/08 [1]

materiál aktivní vrstvy	slitina MnCu18Ni10
materiál pasivní vrstvy	slitina FeNi36 - Invar
materiál mezivrstvy	Cu
měrná tepelná křivost (při 20 °C až 130 °C)	$k = 37,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$
měrný tepelný průhyb (při 20 °C až 100 °C)	$a = 19,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
měrný odpor (při 20 °C)	$\rho = 0,08 \mu\Omega \cdot \text{m} \pm 10 \%$
rozmezí linearity	$(-20 \div 200) \text{ }^{\circ}\text{C}$
teplotní rozsah pro průhyb	$(-70 \div 250) \text{ }^{\circ}\text{C}$
maximální pracovní teplota	350 °C
hustota (při 20 °C)	$\gamma = 8,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
tvrdost aktivní vrstvy podle Vickerse	HV = (180 ÷ 260)
tvrdost pasivní vrstvy podle Vickerse	HV = (190 ÷ 270)
modul pružnosti v tahu (při 20 °C)	$E = 145\,000 \text{ MPa}$
maximální ohybové napětí (při 20 °C)	$\sigma_{\text{max}} = 200 \text{ MPa}$
tepelná vodivost (při 20 °C)	$\lambda = 90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
měrná tepelná kapacita (při 20 °C)	$c = 0,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Nadproudová spoušť TM240 je regulovatelná. Pomocí kotouče regulace jmenovitého (redukovaného) proudu I_r lze posouvat společnou vybavovací lištu a měnit tak volnou vzdálenost mezi touto lištou a pracovními konci bimetalů (prostřednictvím speciálních, na nich nasazených, plastových čepiček). Tím lze plynule regulovat působení tepelné spouště, tedy jmenovitý (redukovaný) proud jističe. Rozsah nastavení je $I_r = 0,7 \div 1 \times I_n$, tedy $I_r = 175 \div 250$ A. Pomocí kotouče regulace zkratové spouště I_i lze prostřednictvím společné lišty plynule měnit vzdálenost kotvy od jha elektromagnetu (tedy sílu pružiny) a tím regulovat působení zkratové spouště. Rozsah nastavení je $I_i = 5 \div 10 \times I_n$, tedy $I_i = 1250 \div 2500$ A. Vypínací charakteristika jističe je uvedena na Obr. 19. [6]



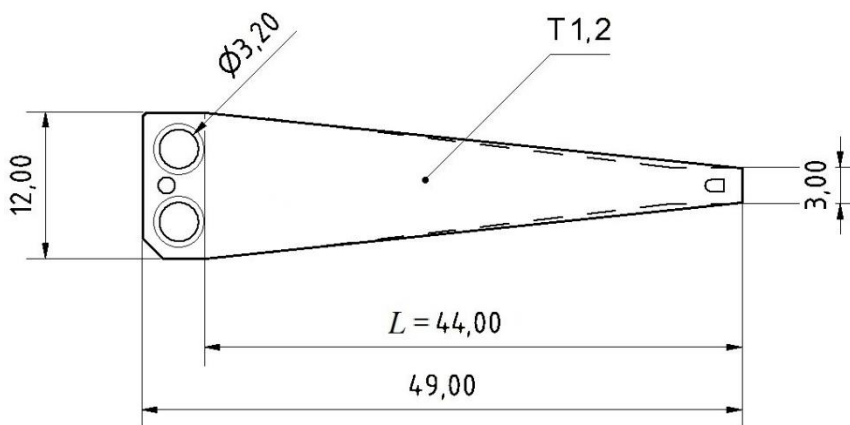
Obr. 19: Vypínací charakteristika jističe Sentron 3VA12 [6]

3.2 Výchozí předpoklady pro analytický návrh

Kromě předpokladů vztahujících se k výpočetním vztahům pro přímý štíhlý pásek (kapitola 2.4) jsou pro tento analytický návrh zavedeny ještě tyto důležité předpoklady:

- Výpočet oteplení bimetalového pásku TB 185/08 není předmětem analytického návrhu a není tedy proveden. Byl by totiž vzhledem ke geometrii (Obr. 18) a způsobu ohřevu pásku obtížný a zcela určitě nepřesný. Při výpočtu je proto uvažováno rovnoměrné oteplení pásku ΔT v celém jeho objemu.
- Protože bimetalový pásek působí na vybavovací mechanismus nadproudové spouště jističe 3VA12 svým pracovním koncem, je při výpočtu síly vyvíjené bimetalovým páskem uvažována celá jeho aktivní délka, tedy $L = 44$ mm.
- Výpočetní vztahy uvedené v kapitole 2.4.2 se vztahují pouze pro pásek zkoseného (lichoběžníkového) tvaru. Na Obr. 18 lze však vidět, že bimetalový pásek TB 185/08 je zkoseného tvaru jen v určité (37 mm dlouhé) části jeho aktivní délky.

Pracovní konec, tedy vybavovací „zobáček“, pásku je ve tvaru obdélníku. V analytickém návrhu je proto zaveden zjednodušující předpoklad: Skutečný tvar pásku je proložen zkoseným tvarem v celé jeho aktivní délce L , tedy od nýtů spojujících pásek s proudovodnou drahou až po pracovní konec včetně vybavovacího „zobáčku“ obdélníkového tvaru. To platí především pro výpočet průhybu při působení protisíly vybavovacího mechanismu a pro výpočet síly vyvíjené páskem, neboť tyto veličiny závisí na rozměru b pásku (tedy jeho šířce).



Obr. 20: Geometrie bimetalu TB 185/08 uvažovaná v analytickém návrhu

3.3 Výpočet volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

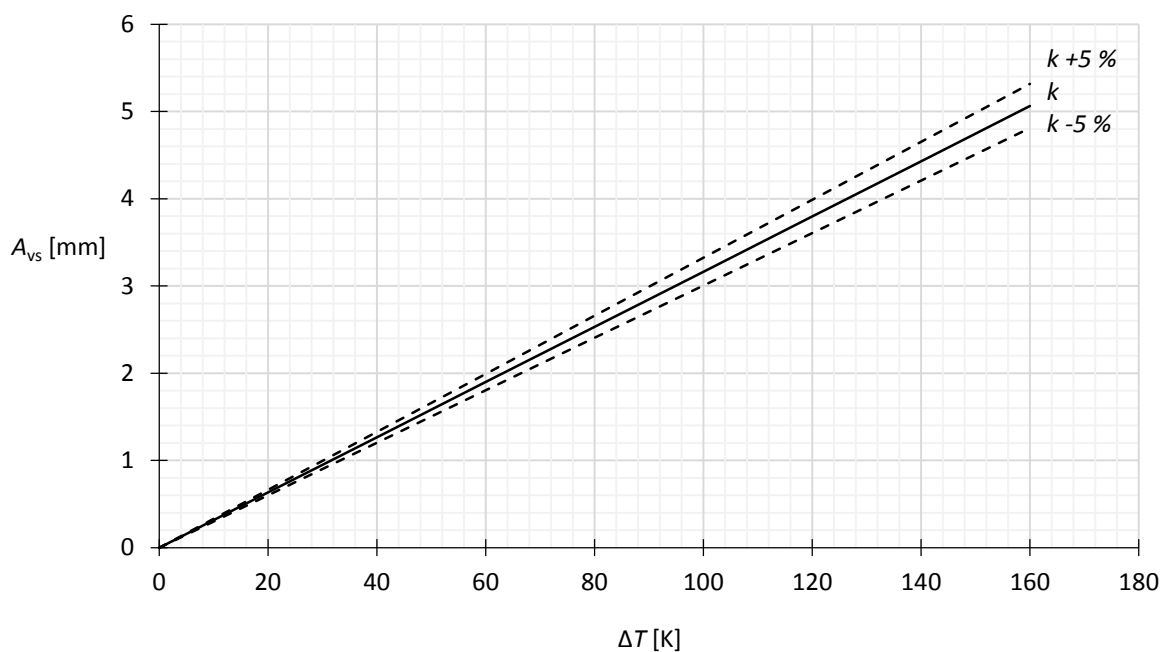
Obecně volný průhyb A_v nezávisí na šířce (tvaru) pásku. Pro výpočet volného průhybu pásku TB 185/08 při oteplení $\Delta T = 20$ K lze proto použít vztah (29) i bez uvažování předpokladu o proložení skutečného tvaru pásku zkoseným tvarem v celé jeho aktivní délce (Obr. 20). Měrná tepelná křivost pásku podle Tab. 3 je $k = 37,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$ a tloušťka pásku podle Obr. 18 je $s = 1,2$ mm.

$$A_{vs} = \frac{a\Delta TL^2}{s} = \frac{0,53k\Delta TL^2}{s} = \frac{0,53 \cdot 37 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 44^2}{1,2} = 0,63 \text{ mm} \quad (47)$$

Vypočtené hodnoty volného průhybu A_{vs} pásku pro oteplení $\Delta T = (0 \div 160)$ K a při uvažování $k = 37,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$ jsou uvedeny v Tab. 4. Jsou také vyneseny do grafické závislosti v Obr. 21.

Tab. 4: Vypočtené hodnoty volného průhybu bimetalu TB 185/08 v závislosti na oteplení

ΔT	A_{vs}		
	k	$k - 5 \%$	$k + 5 \%$
[K]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0,00	0,00	0,00
20	0,63	0,60	0,66
40	1,27	1,20	1,33
60	1,90	1,80	1,99
80	2,53	2,40	2,66
100	3,16	3,01	3,32
120	3,80	3,61	3,99
140	4,43	4,21	4,65
160	5,06	4,81	5,32



Obr. 21: Teoretická závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení

3.4 Výpočet síly vyvíjené bimetalem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu

Součinitel Ψ pro výpočet jednostranně upevněného pásu zkoseného tvaru je určen dosazením do vztahu (26) a (27). Podle geometrie pásu (Obr. 11 a Obr. 18) je rozměr $b_1 = 12 \text{ mm}$ a rozměr $b_2 = 3 \text{ mm}$.

$$n = \frac{b_2}{b_1} = \frac{3}{12} = 0,25 \quad (48)$$

$$\Psi = \frac{2(1-n)^3}{n^2 \left[3 + 4,605 \log\left(\frac{1}{n}\right) \right] - 4n + 1}$$

$$\Psi = \frac{2 \cdot (1-0,25)^3}{0,25^2 \left[3 + 4,605 \cdot \log\left(\frac{1}{0,25}\right) \right] - 4 \cdot 0,25 + 1} = 2,339 \quad (49)$$

Síla F_o vyvíjená páskem TB 185/08 při zcela omezeném průhybu, kdy je pásek fixován v původní poloze, je pro oteplení $\Delta T = 20$ K určena dosazením do vztahu (33). Měrná tepelná křivost pásku podle Tab. 3 je $k = 37,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$ a modul pružnosti v tahu $E = 145\,000$ MPa. Tloušťka pásku je $s = 1,2$ mm.

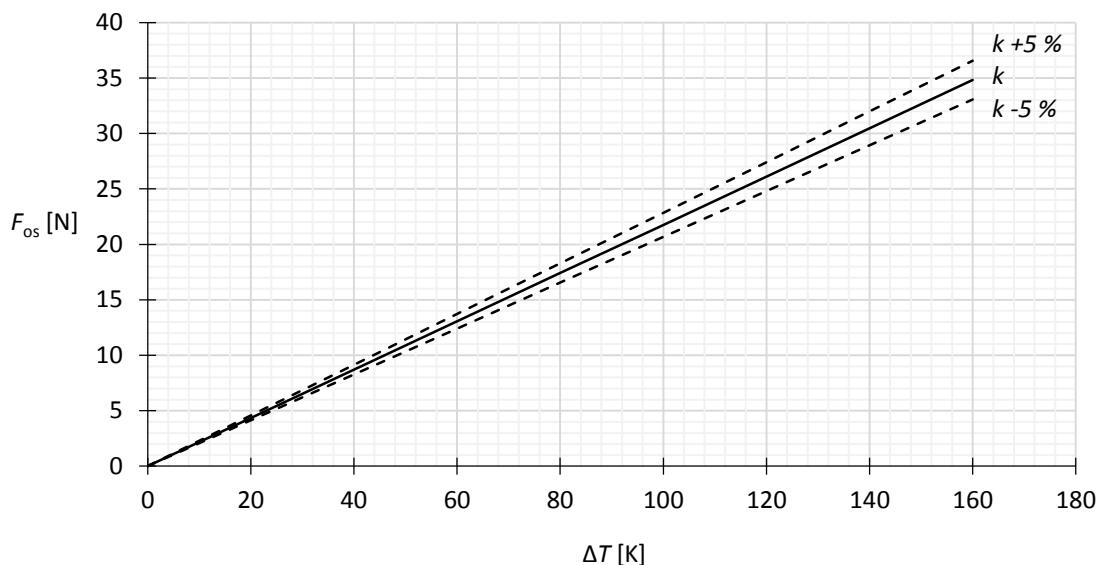
$$F_{os} = \frac{Eb_1 s^3 \Psi}{12L^3} A_v = \frac{0,53kEb_1 s^2 \Psi \Delta T}{12L}$$

$$F_{os} = \frac{0,53 \cdot 37 \cdot 10^{-6} \cdot 145000 \cdot 12 \cdot 1,2^2 \cdot 2,339 \cdot 20}{12 \cdot 44} = 4,35 \text{ N} \quad (50)$$

Vypočtené hodnoty síly F_{os} vyvíjené páskem při zcela omezeném průhybu pro oteplení $\Delta T = (0 \div 160)$ K a při uvažování $k = 37,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$ jsou uvedeny v Tab. 5. Jsou také vyneseny do grafické závislosti v Obr. 22.

Tab. 5: Vypočtené hodnoty síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 při zcela omezeném průhybu v závislosti na oteplení

ΔT	F_{os}		
	k	$k - 5\%$	$k + 5\%$
[K]	[N]	[N]	[N]
0	0,00	0,00	0,00
20	4,35	4,14	4,57
40	8,71	8,27	9,14
60	13,06	12,41	13,71
80	17,41	16,54	18,28
100	21,76	20,68	22,85
120	26,12	24,81	27,42
140	30,47	28,95	31,99
160	34,82	33,08	36,56



Obr. 22: Teoretická závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu

Maximální přípustná síla $F_{\max}$ vyvíjená páskem s ohledem na maximální ohybové napětí je určena dosazením do vztahu (35). Maximální ohybové napětí pásku podle Tab. 3 je $\sigma_{\max} = 200$ MPa.

$$F_{\max} = \frac{\sigma_{\max} b_1 s^2}{6L} = \frac{200 \cdot 12 \cdot 1,2^2}{6 \cdot 44} = 13,09 \text{ N} \quad (51)$$

V případě překročení maximální přípustné síly (resp. maximálního ohybového napětí) dochází k trvalé deformaci a tím k narušení správné funkčnosti pásku.

3.5 Výpočet síly vyvíjené bimetalem v závislosti na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě

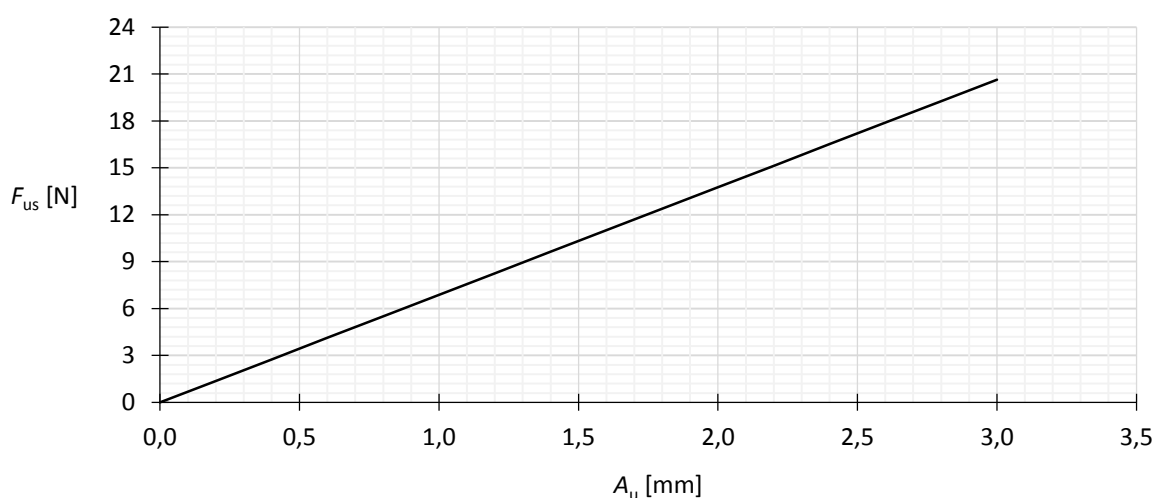
Síla F_u vyvíjená pracovním koncem pásku TB 185/08 pro částečně omezený průhyb $A_u = 0,2$ mm (vlivem působení protisíly F_m vybavovacího mechanismu) je určena dosazením do vztahu (32). Modul pružnosti v tahu pásku podle Tab. 3 je $E = 145\,000$ MPa, tloušťka pásku podle (Obr. 18) je $s = 1,2$ mm, rozměr $b_1 = 12$ mm a vypočtený součinitel jednostranně upevněného pásku zkoseného tvaru podle vztahu (49) je $\Psi = 2,339$.

$$F_{us} = \frac{Eb_1 s^3 \Psi A_u}{12L^3} = \frac{145000 \cdot 12 \cdot 1,2^3 \cdot 2,339 \cdot 0,2}{12 \cdot 44^3} = 1,38 \text{ N} \quad (52)$$

Vypočtené hodnoty síly F_{us} vyvíjené páskem pro částečně omezený průhyb $A_u = (0 \div 3)$ mm jsou uvedeny v Tab. 6. Jsou také vyneseny do grafické závislosti v Obr. 23.

Tab. 6: Vypočtené hodnoty síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 v závislosti na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě

A_u	F_{us}	A_u	F_{us}
[mm]	[N]	[mm]	[N]
0,0	0,00	1,6	11,01
0,2	1,38	1,8	12,38
0,4	2,75	2,0	13,76
0,6	4,13	2,2	15,13
0,8	5,50	2,4	16,51
1,0	6,88	2,6	17,89
1,2	8,25	2,8	19,26
1,4	9,63	3,0	20,64



Obr. 23: Teoretická závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě

3.6 Výpočet průhybu bimetalu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

Je třeba si uvědomit, že při silovém působení F_u pracovního konce pásku na vybavovací mechanismus, působí (podle třetího Newtonova zákona) také vybavovací mechanismus na pracovní konec pásku stejně velkou opačně orientovanou silou F_m (tedy $F_u = -F_m$). Proto průhyb pásku A_m v závislosti na protisíle F_m vybavovacího mechanismu působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě, lze určit přímo pomocí vztahu (32).

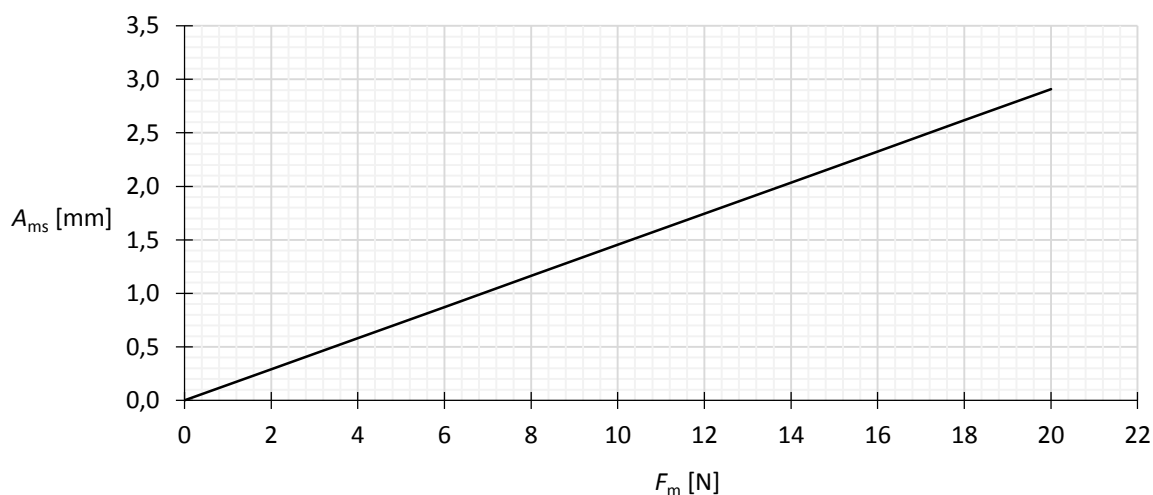
Průhyb pásku TB 185/08 při působení protisíly $F_m = 2$ N na pasivní vrstvu jeho pracovního konce, tedy při silovém působení proti směru jeho přirozeného tepelného průhybu, potom bude

$$A_{ms} = \frac{12F_m L^3}{Eb_1 s^3 \Psi} = \frac{12 \cdot 2 \cdot 44^3}{145000 \cdot 12 \cdot 1,2^3 \cdot 2,339} = 0,29 \text{ mm} \quad (53)$$

Vypočtené hodnoty průhybu pásku A_{ms} při působení protisíly $F_m = (0 \div 20)$ N jsou uvedeny v Tab. 7. Jsou také vyneseny do grafické závislosti v Obr. 24.

Tab. 7: Vypočtené hodnoty průhybu bimetalu TB 185/08 v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

F_m	A_{ms}	F_m	A_{ms}
[N]	[mm]	[N]	[mm]
0	0,00	12	1,74
2	0,29	14	2,04
4	0,58	16	2,33
6	0,87	18	2,62
8	1,16	20	2,91
10	1,45	-	-



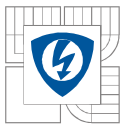
Obr. 24: Teoretická závislost průhybu bimetalu TB 185/08 na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

3.7 Zhodnocení analytického návrhu

Na základě znalosti oteplovací charakteristiky (závislosti oteplení na čase) bimetalu TB 185/08 v každém pólu nadproudové spouště TM240 při ohřevu určitým nadproudem a teoretických závislostí získaných v tomto analytickém návrhu je možné také určit časovou závislost:

- volného průhybu pásku
- průhybu pásku za současného působení protisíly vybavovacího mechanismu určité velikosti
- síly vyvíjené páskem při zcela omezeném průhybu vlivem působení protisíly mechanismu

Odtud lze pro nadproud určité velikosti a pro určitou nastavenou volnou vzdálenost mezi společnou vybavovací lištou a pracovními konci bimetalů, tedy pro určitý nastavený jmenovitý (redukovaný) proud, určit dobu potřebnou k zapůsobení pásku na tuto



vybavovací lištu, pomocí níž dojde k uvolnění západky spínacího mechanismu jističe a tím tedy určit časově závislou část vypínací charakteristiky nadproudové spouště. To však již není předmětem této práce.

Vzhledem k velmi obtížnému a nepřesnému výpočtu oteplení pásku, lze výše zmíněné oteplovací charakteristiky získat pouze experimentálně.

4 MĚŘENÍ NA BIMETALOVÉ SPOUŠTI

Cílem tohoto měření bylo ověření předchozího analytického návrhu. Jedná se tedy o měření na termomagnetické nadproudové spoušti TM240, obsažené v jističi Sentron 3VA12.

Na bimetalu TB 185/08 středního pólu nadproudové spouště bylo provedeno měření:

- volného průhybu v závislosti na oteplení
- síly vyvíjené páskem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu
- průhybu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

Volný průhyb a síla bimetalu v závislosti na oteplení byly pro jednoduchost měřeny pouze v jednopólovém zapojení jističe. Měření bylo provedeno v laboratoři Vědecko-technického parku profesora Lista FEKT VUT v Brně.

4.1 Měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

4.1.1 Příprava na měření

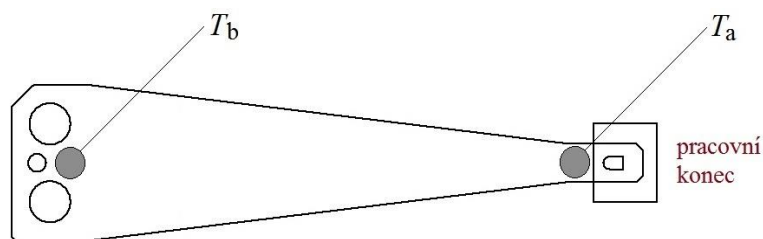
Vzhledem k umístění termomagnetické spouště byl pro účel měření ze spodní strany jističe, těsně nad připojovací svorkou středního pólu, odřezán kus vnějšího plastového krytu. Ve stejném místě byl do vnějšího plastového krytu vyvrtán otvor pro snímání polohy pracovního konce bimetalu. Přes tento otvor byl protažen speciální nástavec s volně zavěšenou plastovou trubičkou a terčíkem, sloužící výhradně pro měření průhybu bimetalu. Nástavec byl nasazen přímo na plastovou čepičku pracovního konce bimetalu. K povrchu pasivní vrstvy bimetalového pásku byly následně pomocí vysokoteplotní stříbrné pasty s velmi dobrou tepelnou vodivostí připevněny dva termočlánky typu K pro měření jeho teploty. První termočlánek byl připevněn k samotnému pracovnímu konci pásku, těsně pod plastovou čepičku, druhý pak k pevnému konci pásku, do prostoru mezi nýty spojující bimetal s proudovodnou drahou (Obr. 25).

Pro účel měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení, tedy bez působení protisíly mechanismu, byl z jističe vyjmut vybavovací mechanismus nadproudové spouště včetně plastového krytu i vybavovacích lišt, kterými jsou spřaženy všechny tři póly jističe. Otvorem na přední straně jističe vzniklým vyjmutím těchto prvků byly z nadproudové spouště vyvedeny oba termočlánky pro měření teploty bimetalu. Poté byl otvor zakryt izolační lepicí páskou, aby nedocházelo k nežádoucím tepelným výměnám s okolním prostředím a tím k ovlivňování výsledků měření.

Jistič byl následně v klasické pracovní poloze umístěn na svislou nosnou desku a střední pól, ve kterém probíhalo měření teploty a průhybu bimetalu, byl pomocí silových vodičů připojen k proudovému zdroji. K nosné desce byl pod jističem připevněn

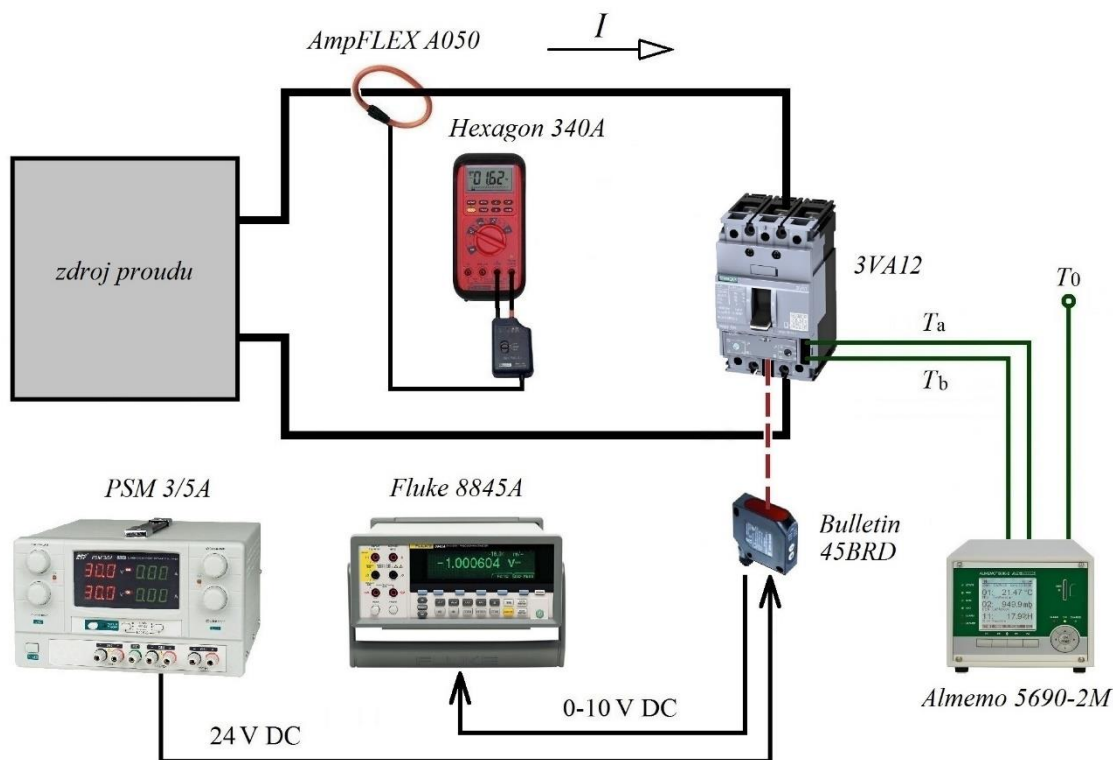
fotoelektrický laserový senzor Bulletin 45BRD pro snímání polohy terčíku volně zavěšeného na pracovním konci bimetalu pomocí speciálního nástavce (*Obr. 27*). Protože provozní měřicí rozsah senzoru je 45 až 85 mm, byl senzor k nosné desce připevněn ve vzdálenosti přibližně 70 mm od terčíku, přičemž paprsek senzoru byl namířen kolmo k terčíku a přesně na jeho střed. Při tomto způsobu měření pak lze uvažovat, že v celém rozsahu průhybu pásku v nadproudové spoušti průhyb terčíku odpovídá skutečnému průhybu bimetalu A_{vm} . Případný rozdíl mezi průhybem terčíku a bimetalu plynoucí z *Obr. 27* je v měřeném rozsahu zanedbatelný. Laserový senzor byl připojen k napájecímu stejnosměrnému laboratornímu zdroji PSM 3/5A. Analogový DC výstup laserového senzoru reprezentující detekovanou vzdálenost v jeho provozním měřicím rozsahu byl připojen ke stolnímu digitálnímu multimetru Fluke 8845A.

Oba termočlánky měřící teplotu bimetalu byly pomocí konektorů Almeno ZA9000 FS3 připojeny na vstupy M0 a M1 měřicí ústředny Almemo 5690-2M. K měřicí ústředně byl na vstup M2 stejným způsobem připojen také termočlánek typu K pro měření teploty okolí. Jeho pracovní konec byl pomocí vysokoteplotní stříbrné pasty připevněn k měděné destičce zavěšené na provázku ve stejné výšce, jako je jistič umístěný na nosné desce.



Obr. 25: Místa měření teploty na pasivní vrstvě bimetalu TB 185/08

Pro měření velikosti AC proudu protékajícího jističem byl silový vodič vedoucí od proudového zdroje k měřenému pólu jističe provlečen přes klešťový transformátor proudu AmpFLEX A050. Analogový DC výstup proudového transformátoru byl připojen k digitálnímu multimetru Hexagon 340A. Principiální schéma zapojení je znázorněno na *Obr. 26*.



Obr. 26: Schéma zapojení pro měření volného průhybu bimetalu

4.1.2 Postup měření

Ještě před začátkem měření byly všechny měřicí přístroje připojeny k napájení. Pomocí měřicí ústředny Almemo 5690-2M a k ní připojených termočlánků byla změřena teplota okolí T_0 a teplota pracovního konce T_a a pevného konce bimetalu T_b „za studena“, tedy bez předchozího proudového zatížení. Pomocí stejnosměrného laboratorního zdroje PSM 3/5A bylo nastaveno napájecí napětí 24 V laserového senzoru Bulletin 45BRD. Na digitálním multimetru Fluke 8845A připojenému k analogovému výstupu laserového senzoru byla odečtena hodnota DC napětí reprezentujícího počáteční detekovanou vzdálenost $I_{poč}$ terčíku volně zavěšeného na pracovním konci bimetalu v měřicím rozsahu senzoru při těchto počátečních teplotách T_a a T_b (Obr. 27). Současně byl na měřicí ústředně Almemo 5690-2M spuštěn automatický záznam teploty za účelem změření závislosti oteplení bimetalu na čase. Měřené hodnoty teploty T_a , T_b a T_0 byly s nastaveným časovým krokem 1 s automaticky ukládány na paměťovou kartu vloženou do slotu měřicí ústředny, a to po celou dobu měření.

Poté byla pomocí proudového zdroje a digitálního multimetru Hexagon 340A připojenému ke klešťovému transformátoru proudu AmpFLEX A050 nastavena velikost proudu protékajícího měřeným pólem jističe na $I = 262,5$ A, tj. $I = 1,05 \times I_n$. Jedná se o hodnotu smlouveného nevypínacího proudu I_{nt} u vypínací charakteristiky kompaktních jističů, při které jistič nesmí podle kapitoly 2.7 vypnout po smlouvenou dobu 2 h. Bimetal se vlivem průchodu proudu začal ohřívat. Pomocí měřicí ústředny Almemo 5690-2M a k

Jakmile teplota obou konců bimetalu (T_a a T_b) dosáhla své ustálené hodnoty, byl proudový zdroj vypnut a jističem tedy neprotékal žádný proud ($I = 0$ A). Stejným postupem jako při ohřevu byla měřena teplota obou konců bimetalu a vzdálenost terčíku zavěšeného na pracovním konci bimetalu i při chladnutí bimetalu až do doby, kdy se teplota obou konců bimetalu ustálila na hodnotě přibližně odpovídající teplotě okolí ($T_a \approx T_b \approx T_0$).

Po vychladnutí bimetalu ($T_a \approx T_b \approx T_0$) byla na digitálním multimetru Fluke 8845A odečtena hodnota DC napětí reprezentujícího novou počáteční detekovanou vzdálenost $l_{\text{poč}}$ terčíku při nových počátečních teplotách T_a a T_b . Pomocí proudového zdroje a digitálního multimetru Hexagon 340A byla nastavena velikost proudu protékajícího měřeným pólem jističe na $I = 325 \text{ A}$, tj. $I = 1,3 \times I_n$. Jedná se o hodnotu smlouveného vypínacího proudu I_t u vypínací charakteristiky kompaktních jističů, při které jistič musí podle kapitoly 2.7 vypnout do smlouvené doby 2 h. Při ohřevu proudem $I = 325 \text{ A}$ a

následném chladnutí byla měřena teplota obou konců bimetalu a vzdálenost terčíku stejným způsobem jako při předchozím ohřevu proudem $I = 262,5$ A.

Naměřené hodnoty výstupního DC napětí laserového senzoru pomocí multimetru Fluke 8845A byly přepočítány na odpovídající detekovanou vzdálenost l terčíku v měřicím rozsahu senzoru. Z naměřených teplot T_a a T_b byla určena průměrná teplota pásku T . Pro zatěžovací proud $I = 262,5$ A i $I = 325$ A byla z naměřených hodnot sestrojena grafická závislost volného průhybu bimetalu A_{vm} na oteplení ΔT při ohřevu i chladnutí. Pro obě hodnoty zatěžovacího proudu byla z automaticky naměřených hodnot teploty T_a , T_b a T_0 , ukládaných na paměťovou kartu a exportovaných do formátu Microsoft Office Excel graficky sestrojena oteplovací charakteristika bimetalu, tedy závislost oteplení na čase. Ze změřené oteplovací charakteristiky a závislosti volného průhybu na oteplení byla následně sestrojena také závislost volného průhybu na čase. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, příklad výpočtu a fotografie z měření jsou uvedeny v příloze A této práce.

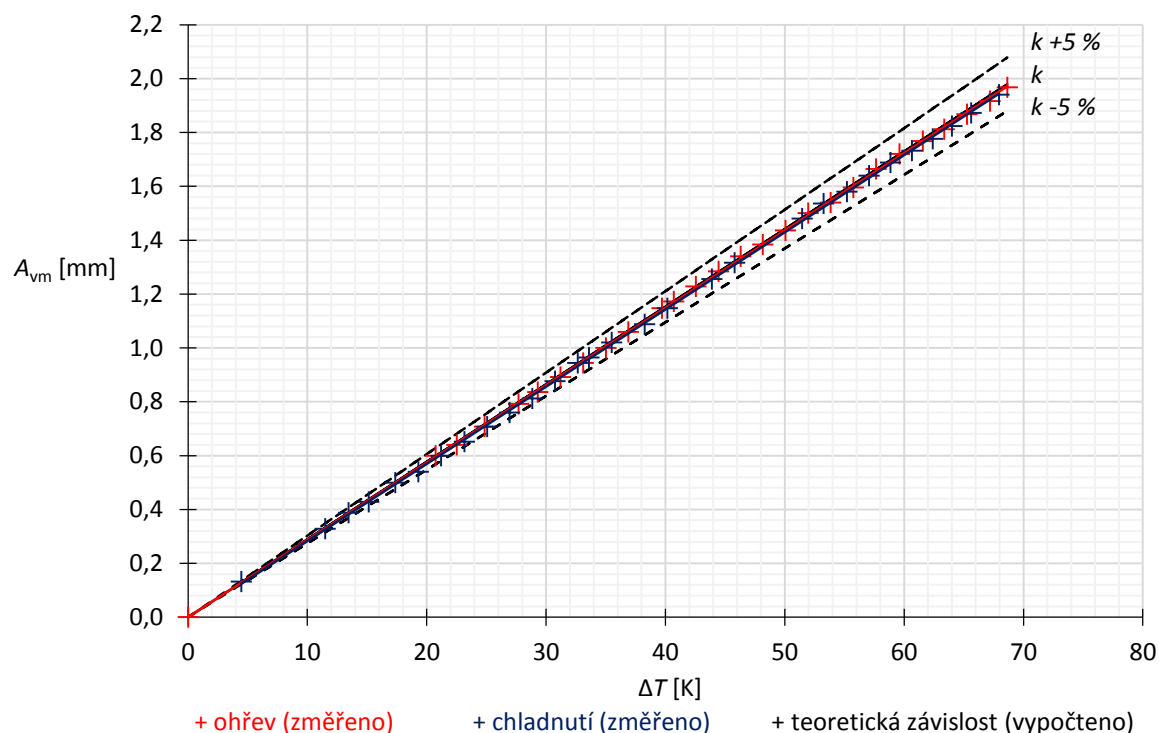
V analytickém návrhu (kapitola 3.3) je při výpočtu volného průhybu uvažována konstantní celková aktivní délka pásku $L = 44$ mm. Vzhledem ke způsobu měření průhybu pomocí volně zavěšeného terčíku je však nutné při výpočtu teoretického průhybu A_{vs} uvažovat aktivní délku pásku L_1 , jak je znázorněno na Obr. 27. Navíc, z hlediska analytického návrhu, průhyb terčíku A_{vm} odpovídá průhybu bimetalu vždy pouze pro určitou aktivní délku L_1 . S rostoucím průhybem totiž roste rovněž vzdálenost dx na Obr. 27, a proto se aktivní délka pásku L_1 zkracuje. Aby se výsledky měření průhybu (pro dané oteplení) daly porovnat s výsledky získanými z analytického návrhu, není při výpočtu teoretického průhybu A_{vs} vzdálenost dx uvažována. Její velikost je totiž vzhledem k velikosti aktivní délky L_1 zanedbatelná v celém měřeném rozsahu průhybu. Aktivní délka přímého pásku L_1 (při počáteční teplotě T_{poc}) byla změřena ($L_1 = 42$ mm) a poté použita při výpočtu teoretického průhybu A_{vs} (Příloha A), kde je považována za konstantní.

4.1.3 Použité přístroje

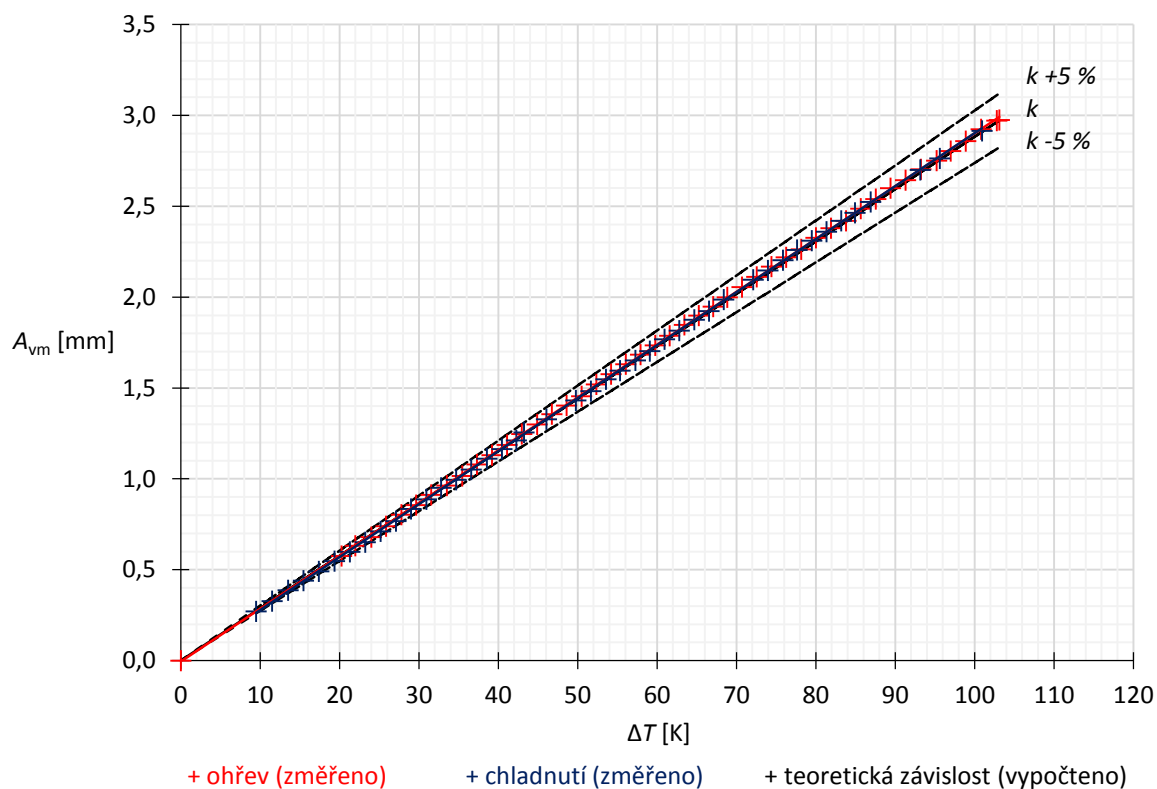
Tab. 8: Seznam použitých přístrojů pro měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

Název, typ	Technické údaje	Výrobní (evidenční) číslo	Výrobce
Zdroj proudu			
Klešťový transformátor proudu AmpFLEX A050	- měření AC proudu jakýchkoliv vodičů - rozsah 0-300/3000 A - rozlišení 1 A = 10/1 mV - základní přesnost $\pm 1 \%$ [9]	SAP: 01000213338-0000	Chauvin Arnoux
Multimetr Hexagon 340A	- při 50 Hz v celém měřicím rozsahu AC napětí přesnost $\pm (0,5\% \text{ ze čtení} + 3 \text{ digit})$ [10]	MFR.#: 122180537	Amprobe
Laboratorní zdroj PSM 3/5A	- 2x nastavitelný DC výstup 0-30 V, 0-5 A - 1x pevný DC výstup 5 V/1 A - při konstantním napětí odchylka $< 1 \times 10^{-4} + 3 \text{ mV}$ ($\pm 10 \%$ z napěťového rozsahu) [11]	SAP: 001000216811-0000 Ser NO: 10102589	British Standard Tester
Stolní multimetr Fluke 8845A	- rozlišení 6,5 digits - v celém měřicím rozsahu DC napětí přesnost (0,0035 % ze čtení + 0,0005 % z rozsahu) - max. rozlišení DC napětí 100 nV [12]	SAP: 001000233414-0000	Fluke
Fotoelektrický laserový senzor Bulletin 45BRD	- provozní rozsah 45 až 85 mm - měřicí rozsah 40 mm - analogový DC výstup 0 až 10 V (0 V při 45 mm; 10 V při 85 mm) - rozlišení 20 μm [13]	45BRD-8JKB1-D4 Ser A	Allen-Bradley
Měřicí ústředna Almemo 5690-2M	- 10 galv. oddělených vstupů pro všechny termočlánky s miniaturním plochým konektorem - 9 primárních kanálů - vzorkovací frekvence až 50 Hz [14]	SAP: 000000317335-0000	Ahlborn
3x vstupní programovatelný konektor Almeno ZA9000 FS3	- pro připojení termočlánků a jiných napěťových signálů k měřicí ústředně Almeno - DC napětí $\pm 2,6 \text{ V}$ - rozlišení 0,1 mV - přesnost $\pm 0,1 \%$ ze čtení [15]		Ahlborn
3x termočlánek typu K	- teplotní rozsah -200 až 1250 °C - přesnost 0,75 % (2,2 °C) [16]		

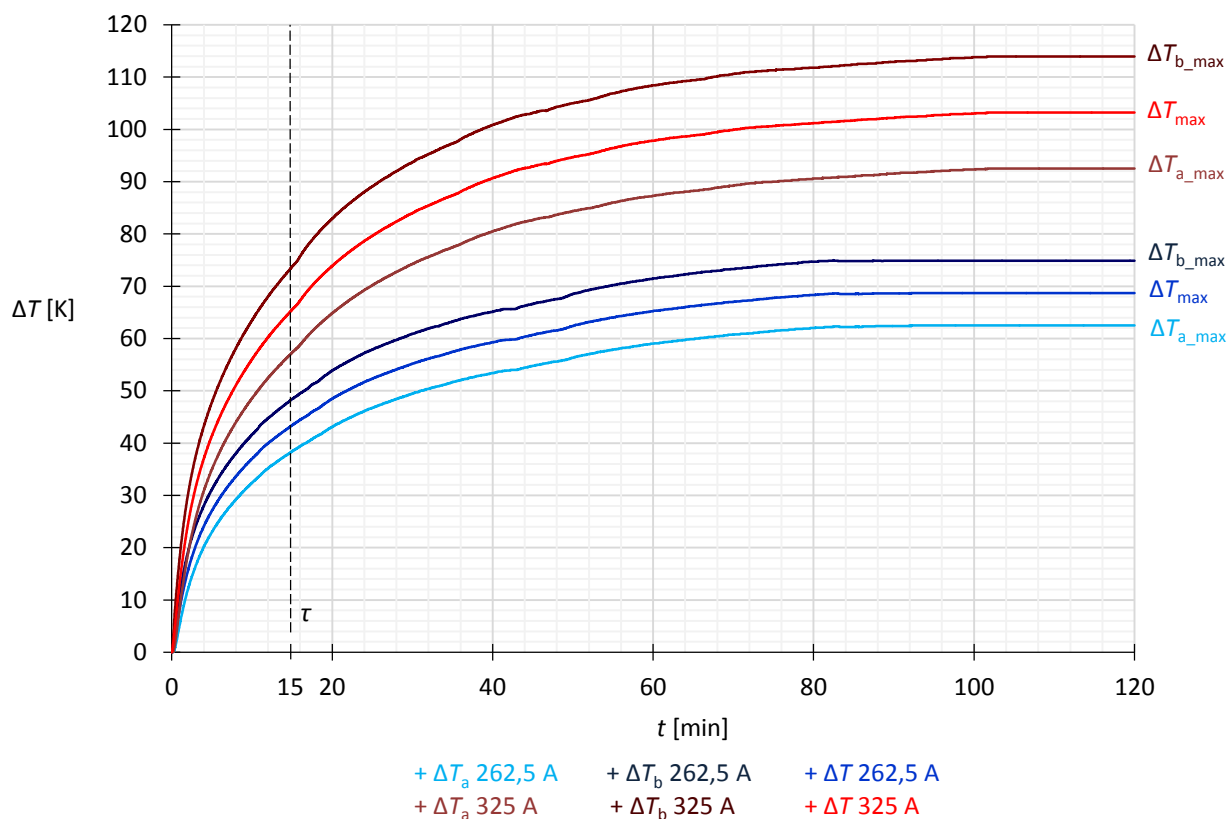
4.1.4 Změřené závislosti



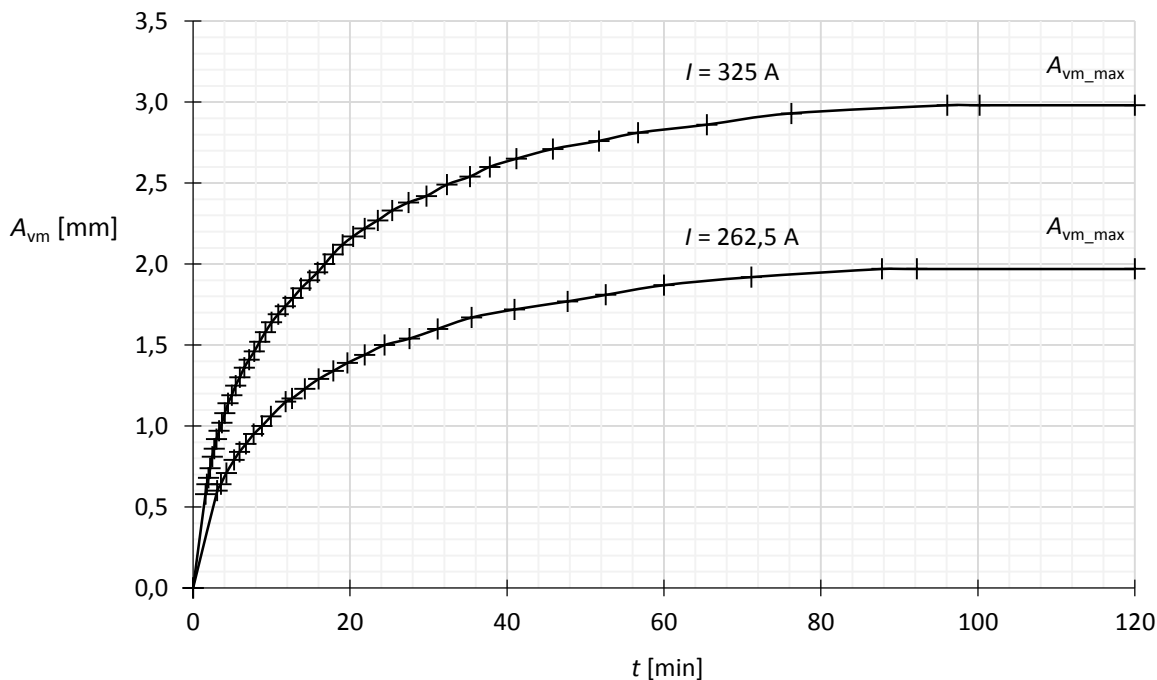
Obr. 28: Změřená závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení při ohřevu proudem
 $I = 262,5 \text{ A}$



Obr. 29: Změřená závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení při ohřevu proudem
 $I = 325 \text{ A}$



Obr. 30: Změřená závislost oteplení bimetalu TB 185/08 na čase

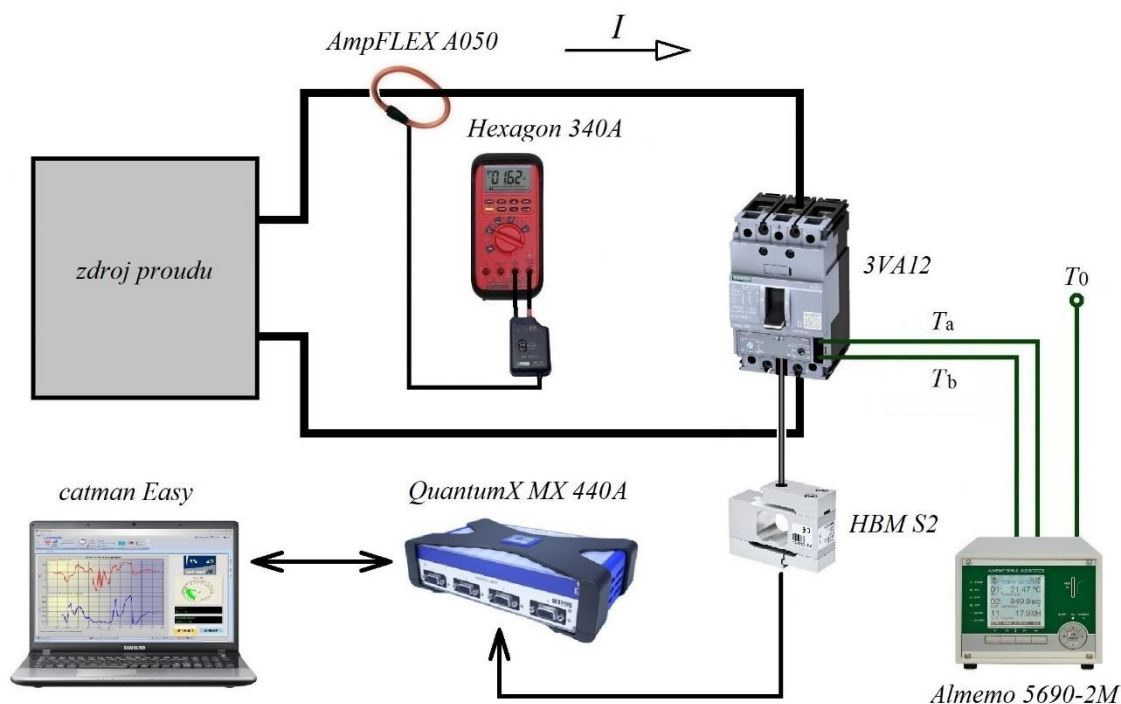


Obr. 31: Změřená závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na čase

4.2 Měření síly vyvíjené páskem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu

4.2.1 Příprava na měření

Jistič byl ponechán v klasické pracovní poloze na svislé nosné desce, připojen jednopólově pomocí silových vodičů k proudovému zdroji. K nosné desce byl pod jističem připevněn tenzometrický snímač S2 se speciálním vyrobeným táhlem pro snímání síly vyvíjené pracovním koncem bimetalu. Táhl bylo protáhnuo skrz otvor vyvrtaný ze spodní strany jističe nad připojovací svorkou středního pólu, pomocí něž byl měřen průhyb bimetalu. Z pracovního konce bimetalu byla odstraněna plastová čepička. Pro účel měření bylo třeba pásek zafixovat v původní (přímé) poloze, tedy zcela omezit jeho průhyb. Proto byl snímač síly k nosné desce připevněn dostatečně pevně a v takové vzdálenosti, aby táhlo snímače přiléhalo kolmo k pracovnímu konci pasivní vrstvy bimetalu. Snímač byl připojen na univerzální vstup měřicí ústředny QuantumX MX440A, řízené přes Ethernet měřícím programem catman Easy z osobního počítače. Jedná se o software vyvinutý společností HBM, sloužící ke sběru, vizualizaci a vyhodnocení dat [19].



Obr. 32: Schéma zapojení pro měření síly vyvíjené bimetalem při zcela omezeném průhybu

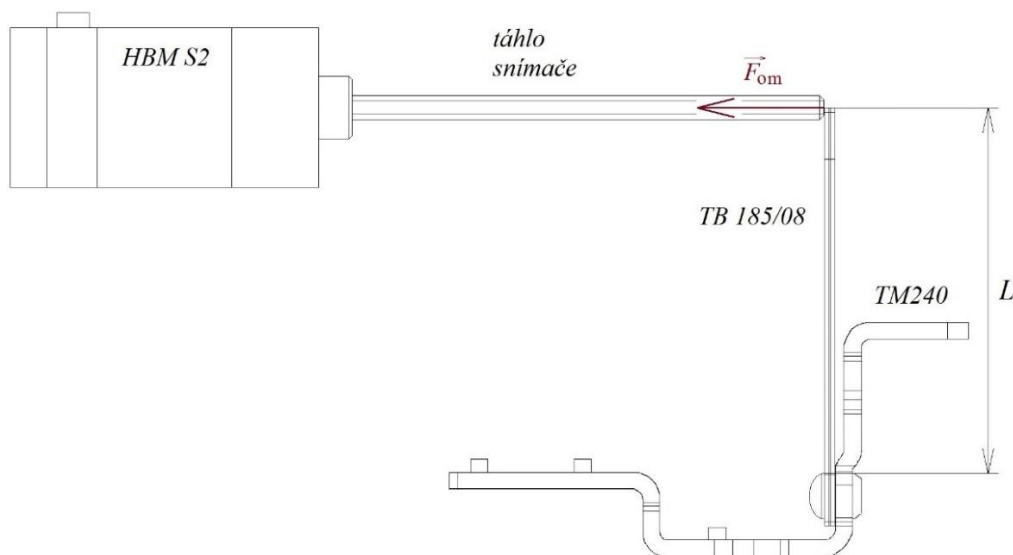
Stejně jako při měření volného průhybu, byla teplota obou konců bimetalu (T_a a T_b) i teplota okolí T_0 měřena termočlánky typu K připojenými k měřicí ústředně Almemo 5690-2M. Toto měření probíhalo rovněž s vyjmutým vybavovacím mechanismem nadproudové spouště. Otvor na přední straně jističe byl znovu zakryt

izolační lepicí páskou, aby nedocházelo k nežádoucím tepelným výměnám s okolním prostředím a tím k ovlivňování výsledků měření. Velikost AC proudu protékajícího jističem byla opět měřena pomocí klešťového transformátoru proudu AmpFLEX A050 a k němu připojenému digitálnímu multimetru Hexagon 340A. Principiální schéma zapojení je znázorněno na Obr. 32.

4.2.2 Postup měření

Ještě před začátkem měření byly všechny měřicí přístroje připojeny k napájení. Na osobním počítači byl spuštěn měřicí program catman Easy. V programu byl založen nový DAQ projekt, ve kterém byla nakonfigurována měřicí ústředna QuantumX MX440A s připojeným snímačem síly S2. Poté byl programem spuštěn automatický záznam síly vyvíjené bimetalem při zcela omezeném průhybu. Měřené hodnoty síly byly s nastaveným časovým krokem 1 s automaticky ukládány do počítače. Ve stejném okamžiku byl na měřicí ústředně Almemo 5690-2M spuštěn automatický záznam teploty bimetalu. Měřené hodnoty teploty T_a , T_b a T_0 byly s nastaveným časovým krokem rovněž 1 s automaticky ukládány na paměťovou kartu vloženou do slotu měřicí ústředny.

Poté byla pomocí proudového zdroje a digitálního multimetru Hexagon 340A připojenému ke klešťovému transformátoru proudu AmpFLEX A050 nastavena velikost proudu protékajícího měřeným pólem jističe na $I = 262,5$ A, tj. $I = 1,05 \times I_n$. Bimetal se vlivem průchodu proudu začal ohřívat. V prostředí programu catman Easy byla graficky zobrazována okamžitá velikost síly F_{om} vyvíjené bimetalem. Velikost proudu protékajícího jističem byla udržována na hodnotě $I = 262,5$ A po celou dobu ohřevu.



Obr. 33: Měření síly vyvíjené bimetalem při zcela omezeném průhybu

Podle analytického návrhu (kapitola 3.4) je maximální přípustná síla vyvíjená páskem s ohledem na maximální ohybové napětí $F_{max} = 13,09$ N. Aby byla zajištěna správná funkce pásku a nedošlo tedy k jeho poškození, byl v okamžiku, kdy velikost síly

dosáhla hodnoty přibližně $F_{om} = 10$ N, proudový zdroj vypnut a jističem tedy neprotékal žádný proud ($I = 0$ A). Automatický záznam síly a teploty probíhal nadále i při chladnutí bimetalu až do okamžiku, kdy se teplota obou konců bimetalu ustálila na hodnotě přibližně odpovídající teplotě okolí ($T_a \approx T_b \approx T_0$). Poté byl vypnut.

Stejným způsobem jako při předchozím ohřevu proudem $I = 262,5$ A byla měřena síla a teplota bimetalu také při ohřevu proudy $I = 325$ A a $I = 470$ A.

Automaticky naměřené hodnoty síly a teploty bimetalu v závislosti na čase byly exportovány do formátu Microsoft Office Excel. Pro zatěžovací proudy $I = 262,5$ A, $I = 325$ A a $I = 470$ A byla z naměřených časových závislostí následně sestrojena grafická závislost síly vyvíjené bimetalem při zcela omezeném průhybu na oteplení při ohřevu i chladnutí. Ta pak byla porovnána se závislostí získanou z analytického návrhu. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, příklad výpočtu a fotografie z měření jsou uvedeny v příloze B této práce.

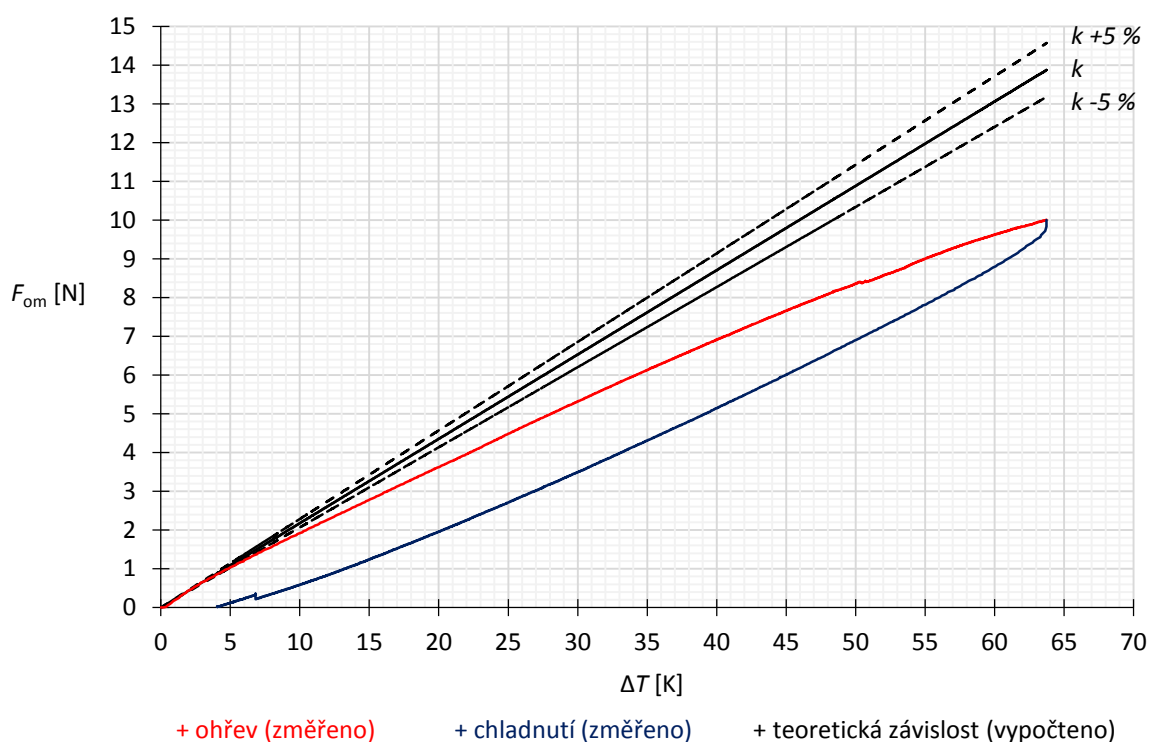
4.2.3 Použité přístroje

Tab. 9: Seznam použitých přístrojů pro měření síly vyvíjené bimetalem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu

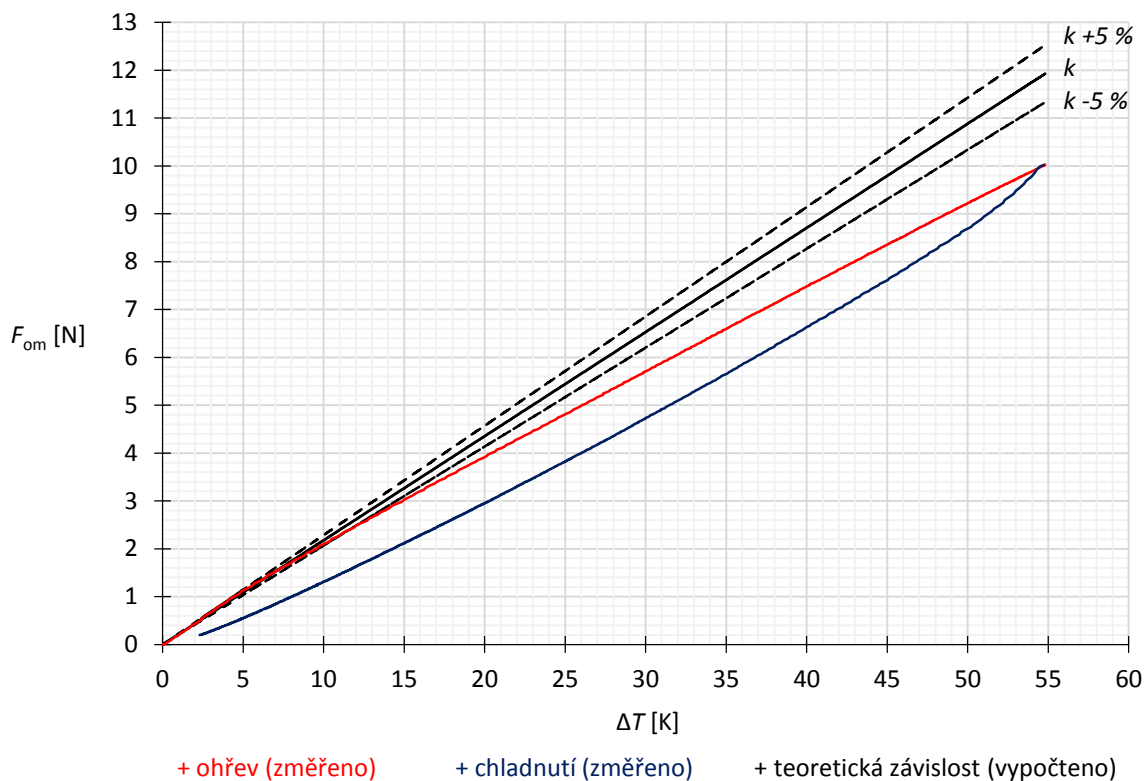
Název, typ	Technické údaje	Výrobní (evidenční) číslo	Výrobce
Zdroj proudu			
Klešťový transformátor proudu AmpFLEX A050	- měření AC proudu jakýchkoliv vodičů - rozsah 0-300/3000 A - rozlišení 1 A = 10/1 mV - základní přesnost ± 1 % [9]	SAP: 01000213338-0000	Chauvin Arnoux
Multimetr Hexagon 340A	- při 50 Hz v celém měřicím rozsahu AC napětí přesnost $\pm (0,5\% \text{ ze čtení} + 3 \text{ digit})$ [10]	MFR.#: 122180537	Amprobe
Tenzometrický snímač síly S2	- provozní rozsah 0 – 200 N - třída přesnosti 0,05 - citlivost 2 mV/V při 200 N - relativní odchylka citlivosti při měření tlakové síly $< \pm 0,25$ % - relativní rozdíl citlivosti při měření tahové/tlakové síly $< \pm 0,1$ % - vlastní prodloužení snímače $< 0,4$ mm - referenční teplota 23 °C [17]	S/N: A0050862	HBM
Měřicí ústředna QuantumX MX440A	- univerzální modul sběru dat řízený programem z PC - 4 univerzální vstupy - vzorkovací frekvence až 19,2 kHz - šířka pásma 3200 Hz [18]	S/N: 0009E5003F02 SAP: 000000317336-0000	HBM

software catman Easy nainstalovaný na osobním počítači	- software sloužící ke sběru, vizualizaci a vyhodnocení dat [19]		
Měřicí ústředna Almemo 5690-2M	- 10 galv. oddělených vstupů pro všechny termočlánky s miniaturním plochým konektorem - 9 primárních kanálů - vzorkovací frekvence až 50 Hz [14]	SAP: 000000317335- 0000	Ahlborn
3x vstupní programovatelný konektor Almeno ZA9000 FS3	- pro připojení termočlánků a jiných napětíových signálů k měřicí ústředně Almeno - DC napětí $\pm 2,6$ V - rozlišení 0,1 mV - přesnost $\pm 0,1$ % ze čtení [15]		Ahlborn
3x termočlánek typu K	- teplotní rozsah -200 až 1250 °C - přesnost 0,75 % (2,2 °C) [16]		

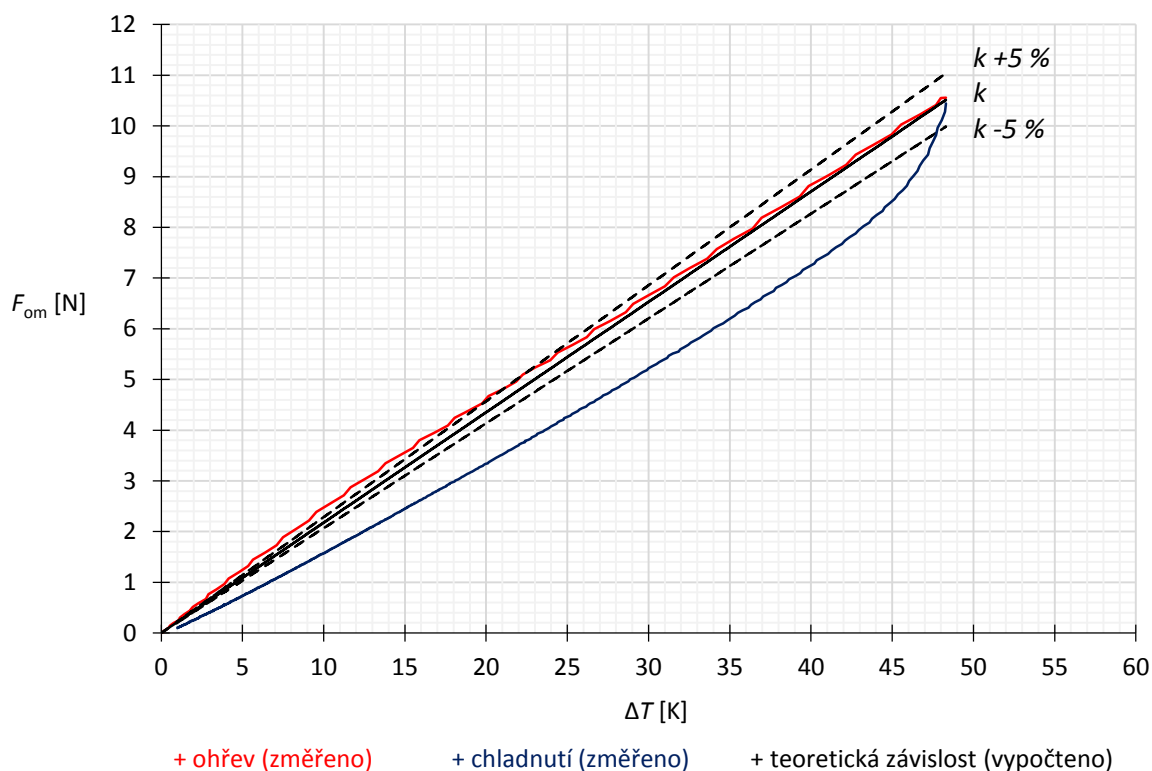
4.2.4 Změřené závislosti



Obr. 34: Změřená závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu a při ohřevu proudem $I = 262,5$ A



Obr. 35: Změřená závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu a při ohřevu proudem $I = 325$ A



Obr. 36: Změřená závislost síly vyvíjené bimetalem TB 185/08 na oteplení při zcela omezeném průhybu a při ohřevu proudem $I = 470$ A

4.3 Měření průhybu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

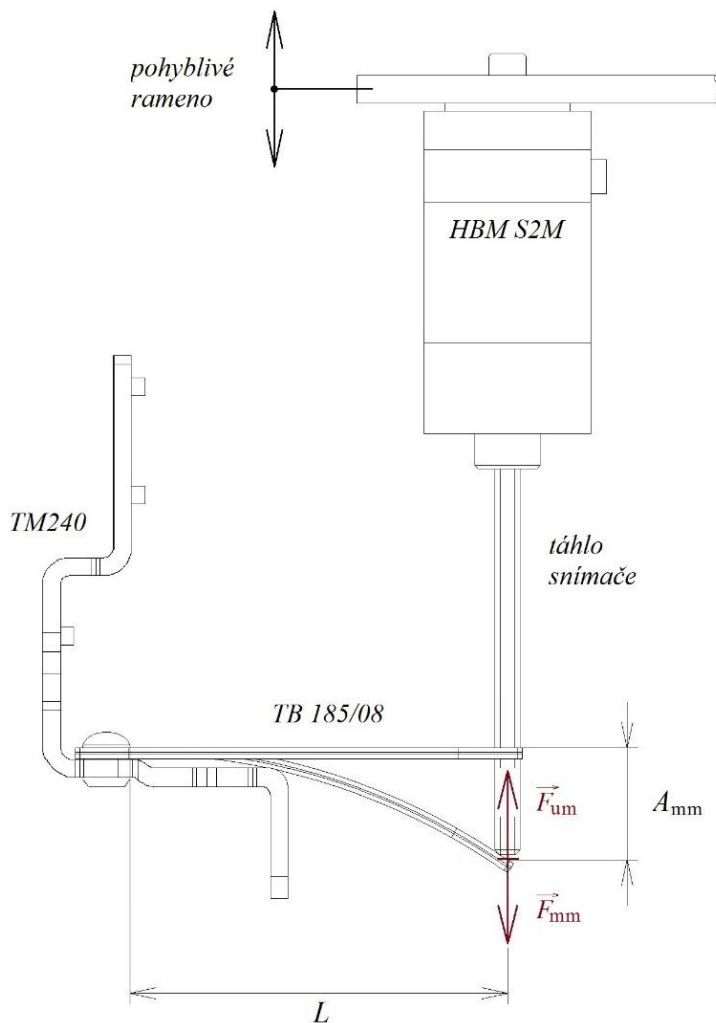
4.3.1 Příprava na měření

Pro měření průhybu pásku A_m v závislosti na protisíle F_m vybavovacího mechanismu za studena, tedy při konstantní teplotě $T = T_a = T_b = T_0$, byl použit manuální testovací stojan SLJ vybavený pohyblivým ramenem s lineárním magnetickým snímačem TMLS-05A-05. Rameno stojanu je uváděno do vertikálního pohybu ručně otočným kolem připojeným na závítovou tyč. Na pohyblivé rameno přípravku byl připevněn tenzometrický snímač S2M se speciálním vyrobeným táhlem pro snímání síly působící na pracovní konec bimetalu. Nadproudová spoušť TM240 byla vyjmuta z jističe 3VA12 a následně upevněna do dílenského svěráku v takové poloze, kdy se bimetal nacházel v horizontální poloze, pasivní vrstvou nahoře. Poloha stojanu SLJ a jeho pohyblivého ramene byla nastavena tak, aby táhlo snímače S2M přiléhalo kolmo k pracovnímu konci pasivní vrstvy bimetalu. Snímač TMLS-05A-05 detekující polohu pohyblivého ramene i snímač síly S2M byly připojeny na univerzální vstupy měřicí ústředny QuantumX MX440A, řízené přes Ethernet měřicím programem catman Easy z osobního počítače.

4.3.2 Postup měření

Na osobním počítači byl spuštěn měřicí program catman Easy. V programu byl založen nový DAQ projekt, ve kterém byla nakonfigurována měřicí ústředna QuantumX MX440A s oběma připojenými snímači. V prostředí programu byla graficky zobrazována jednak okamžitá velikost síly ramene F_m působící na pracovní konec bimetalu, ale i okamžitá poloha pohyblivého ramene stojanu. Pohyblivé rameno bylo pomocí otočného kola přemístěno do takové vertikální polohy, aby táhlo snímače S2M přiléhalo kolmo k pracovnímu konci pasivní vrstvy bimetalu a současně aby velikost síly působící táhlem na bimetal byla velmi malá, avšak nenulová ($F_{mm} < 0,1 \text{ N}$). Tato nastavená velikost síly a polohy ramene byla v programu vynulována, a byla tedy stanovena jako počáteční vztažná hodnota.

V programu byl spuštěn automatický záznam síly a polohy pohyblivého ramena. Měřené hodnoty byly s nastaveným krokem 50 Hz automaticky ukládány do počítače. Pomocí otočného kola bylo pohyblivým ramenem se snímačem S2M a táhlem plynule posouváno a tím silově působeno na bimetal. Ten se vlivem působení táhla snímače začal prohýbat. Jedná se o silové působení na pasivní vrstvu pásku, tedy proti směru jeho přirozeného tepelného průhybu. Okamžitý posuv ramene vůči nastavené počáteční poloze odpovídá přímo okamžitému průhybu bimetalu.



Obr. 37: Měření průhybu v závislosti na protisíle při konstantní teplotě

Podle analytického návrhu (kapitola 3.4) je maximální přípustná síla vyvíjená páskem s ohledem na maximální ohybové napětí $F_{\max} = 13,09$ N. Aby byla zajištěna správná funkce pásku a nedošlo tedy k jeho poškození, byl v okamžiku, kdy velikost síly dosáhla hodnoty přibližně $F_m = 10$ N pohyb zastaven a ramenem bylo plynule posouváno zpět směrem do výchozí polohy. Automatický záznam síly a polohy ramene probíhal nadále až do okamžiku, kdy síla působící na bimetal dosáhla nulové hodnoty ($F_{mm} \approx 0$ N) a rameno se tedy nacházelo v původní poloze. Poté byl záznam vypnut.

Poté byla nadproudová spoušť TM240 v dílenském svěráku vertikálně otočena o 180° a stejným postupem byla měřena síla a poloha ramene také při silovém působení na aktivní vrstvu pásku, tedy ve směru jeho přirozeného tepelného průhybu.

Automaticky naměřené hodnoty síly a polohy ramene v závislosti na čase byly exportovány do formátu Microsoft Office Excel. Pro silové působení proti i ve směru přirozeného tepelného průhybu byla z naměřených časových závislostí následně sestrojena grafická závislost průhybu bimetalu na velikosti protisíly při konstantní

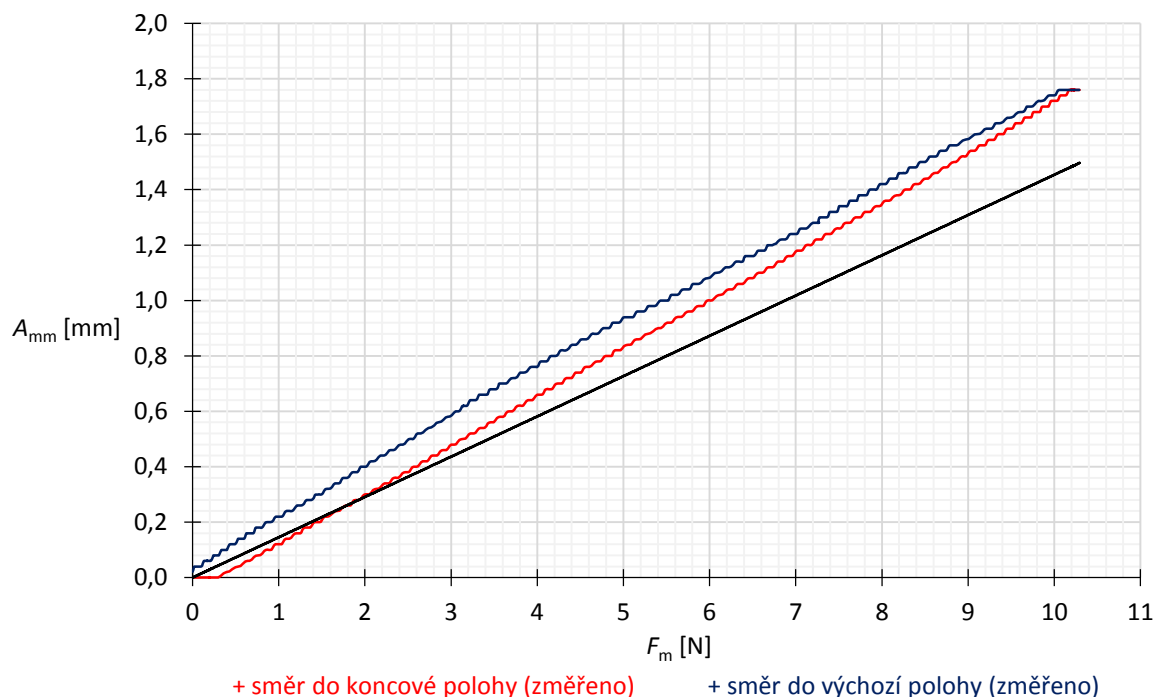
teplotě. Ta pak byla porovnána se závislostí získanou z analytického návrhu. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot, příklad výpočtu a fotografie z měření jsou uvedeny v příloze C této práce.

4.3.3 Použité přístroje

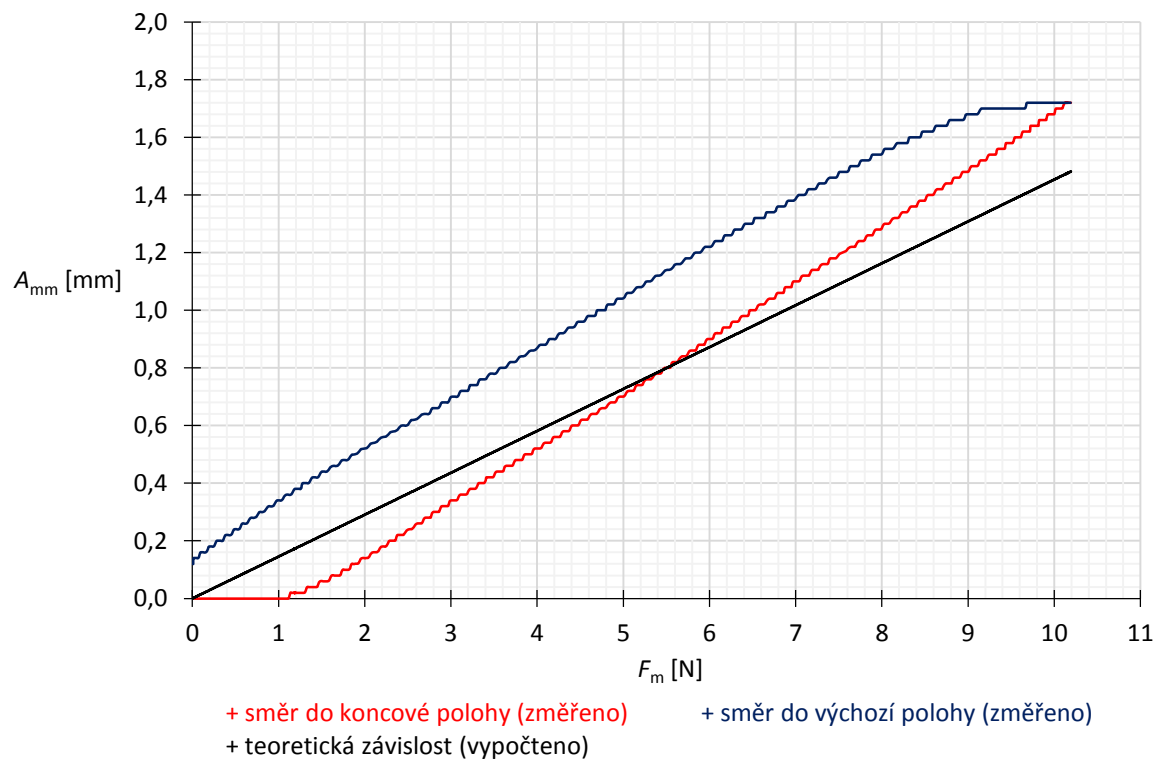
Tab. 10: Seznam použitých přístrojů pro měření průhybu v závislosti na protisíle při konstantní teplotě

Název, typ	Technické údaje	Výrobní (evidenční) číslo	Výrobce
Manuální testovací stojan SLJ	- maximální síla 500 N - efektivní posuv 150 mm - ruční posuv otočným kolem s posuvem 1,5 mm/otáčku [20]	S/N: 4212046866 SAP: 001000216117-0000	SHITO
Magnetický snímač posuvu TMLS-05A-05	- rozlišení 0,005 mm [21]	S/N: TM05A-0909070613	
Tenzometrický snímač síly S2M	- provozní rozsah 0 – 20 N - třída přesnosti 0,05 - citlivost 2 mV/V při 200 N - relativní odchylka citlivosti při měření tlakové síly $< \pm 0,25 \%$ - relativní rozdíl citlivosti při měření tahové/tlakové síly $< \pm 0,1 \%$ - vlastní prodloužení snímače $< 0,4 \text{ mm}$ - referenční teplota 23 °C [17]	S/N: 02548927	HBM
Měřicí ústředna QuantumX MX440A	- univerzální modul sběru dat řízený programem z PC - 4 univerzální vstupy - vzorkovací frekvence až 19,2 kHz - šířka pásma 3200 Hz [18]	S/N: 0009E5003F02 SAP: 000000317336-0000	HBM
software catman Easy nainstalovaný na osobním počítači	- software sloužící ke sběru, vizualizaci a vyhodnocení dat [19]		

4.3.4 Změřené závislosti



Obr. 38: Změřená závislost průhybu bimetalu TB 185/08 na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě a při silovém působení proti směru přirozeného tepelného průhybu



Obr. 39: Změřená závislost průhybu bimetalu TB 185/08 na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě a při silovém působení ve směru přirozeného tepelného průhybu

4.4 Zhodnocení měření

4.4.1 Měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

Z naměřených hodnot (příloha A) a sestrojených grafických závislostí (Obr. 28 a Obr. 29) volného průhybu bimetalu na oteplení jde vidět, že při ohřevu oběma mezními proudy ($I = 1,05 \times I_n = 262,5 \text{ A}$, $I = 1,3 \times I_n = 325 \text{ A}$) a následném chladnutí s rostoucím oteplením přímo úměrně roste také volný průhyb bimetalu. Ustálená, nejvyšší zaznamenaná průměrná teplota pásku při ohřevu proudem $I = 325 \text{ A}$ je $T = 127,7 \text{ °C}$. Celý rozsah měřených teplot (při ohřevu oběma zatěžovacími proudy) se tedy nachází v rozmezí linearit ($-20 \div 200$) °C udávané výrobcem pásku. V tomto rozsahu teplot by se podle normy DIN 1715 změřená hodnota volného průhybu bimetalu A_{vm} při ohřevu i chladnutí neměla lišit o více než $\pm 5 \%$ od teoretické (správné) hodnoty A_{vs} vypočtené pomocí měrné tepelné křivosti k udávané výrobcem. Změřená hodnota průhybu A_{vm} se pro dané oteplení při ohřevu pásku proudem $I = 262,5 \text{ A}$ liší od teoretické hodnoty A_{vs} o $(0,1 \div 1,3) \%$ a při následném chladnutí o $(0 \div 2,9) \%$. V případě ohřevu pásku proudem $I = 325 \text{ A}$ pak o $(0 \div 1,7) \%$ a při následném chladnutí o $(0 \div 2,7) \%$. Změřená závislost $A_{vm} = f(\Delta T)$ tedy odpovídá teoretické závislosti $A_{vs} = f(\Delta T)$, získané z analytického návrhu při uvažování aktivní délky $L_1 = 42 \text{ mm}$.

Z naměřených hodnot (příloha A) a sestrojených grafických závislostí (Obr. 30) oteplení bimetalu na čas jde vidět, že při ohřevu proudem $I = 262,5 \text{ A}$ je ustálené oteplení pracovního konce $\Delta T_{a_max} = 62,5 \text{ K}$, pevného konce $\Delta T_{b_max} = 74,9 \text{ K}$ a z toho vypočtené průměrné ustálené oteplení $\Delta T_{max} = 68,7 \text{ K}$. Doba, za kterou pásek dosáhne průměrného ustáleného oteplení $\Delta T_{max} = 68,7 \text{ K}$ je přibližně $t = 93 \text{ min}$ a časová konstanta, tedy doba, za kterou by pásek dosáhl průměrného ustáleného oteplení $\Delta T_{max} = 68,7 \text{ K}$ pokud by se z jeho povrchu neodvádělo žádné teplo je $\tau = 15 \text{ min}$, protože právě za dobu $t = \tau = 15 \text{ min}$ od začátku průchodu proudu dosáhne okamžité oteplení pásku hodnoty $\Delta T = 0,632 \Delta T_{max} = 43,4 \text{ K}$. Na Obr. 31 jde vidět změřená závislost volného průhybu na čas. Ustálenému oteplení pásku odpovídá průhyb $A_{vm_max} = 1,97 \text{ mm}$.

Při ohřevu proudem $I = 325 \text{ A}$ je ustálené oteplení pracovního konce $\Delta T_{a_max} = 92,5 \text{ K}$, pevného konce $\Delta T_{b_max} = 113,9 \text{ K}$ a z toho vypočtené průměrné ustálené oteplení $\Delta T_{max} = 103,2 \text{ K}$. Doba, za kterou pásek dosáhne průměrného ustáleného oteplení $\Delta T_{max} = 103,2 \text{ K}$ je přibližně $t = 103 \text{ min}$ a časová konstanta, tedy doba, za kterou by pásek dosáhl průměrného ustáleného oteplení $\Delta T_{max} = 103,2 \text{ K}$ pokud by se z jeho povrchu neodvádělo žádné teplo je $\tau = 14,8 \text{ min}$, protože právě za dobu $t = \tau = 14,8 \text{ min}$ od začátku průchodu proudu dosáhne okamžité oteplení pásku hodnoty $\Delta T = 0,632 \Delta T_{max} = 65,2 \text{ K}$. Na Obr. 31 jde vidět změřená závislost volného průhybu na čas. Ustálenému oteplení pásku odpovídá průhyb $A_{vm_max} = 2,98 \text{ mm}$.

Z naměřených hodnot jde vidět, že teplota pevného konce pásku T_b je vlivem způsobu ohřevu (paralelně vedoucí částí proudovodné dráhy) v každém okamžiku vyšší než teplota pracovního konce T_a . Rozdíl mezi teplotami T_b a T_a je v ustáleném stavu 12,4 °C při ohřevu proudem $I = 262,5$ A, a 21,4 °C při ohřevu proudem $I = 325$ A.

4.4.2 Měření síly vyvíjené bimetalem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu

Z naměřených hodnot (příloha B) a sestrojených grafických závislostí (Obr. 34 až Obr. 36) jde vidět, že při ohřevu proudy ($I = 262,5$ A, $I = 325$ A a $I = 470$ A) a následném chladnutí s rostoucím oteplením roste také velikost síly vyvíjené páskem při zcela omezeném průhybu. Nejvyšší zaznamenaná průměrná teplota pásku je $T = 86,55$ °C a to při ohřevu proudem $I = 262,5$ A. Celý rozsah měřených teplot (při ohřevu všemi zatěžovacími proudy) se tedy nachází v rozsahu teplot (20 ÷ 130) °C, ve kterém výrobce pásku garantuje, že měrná tepelná křivost pásku je $k = 37 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$. V tomto rozsahu teplot by se tedy změřená hodnota síly vyvíjené bimetalem F_{om} při zcela omezeném průhybu a při ohřevu i chladnutí neměla lišit o více než $\pm 5 \%$ od teoretické (správné) hodnoty F_{os} vypočtené pomocí měrné tepelné křivosti k . Změřená hodnota síly F_{om} se však pro dané oteplení při ohřevu pásku proudem $I = 262,5$ A liší od teoretické hodnoty F_{os} o (0,1 ÷ 99,7) % a při následném chladnutí o (27,9 ÷ 98,4) %. V případě ohřevu pásku proudem $I = 325$ A o (0 ÷ 102,1) % a při následném chladnutí o (15,8 ÷ 61,5) %.

Z výše uvedeného a sestrojených grafických závislostí (Obr. 34 a Obr. 35) jde tedy vidět, že pro oba mezní proudy ($I = 262,5$ A a $I = 325$ A) velikost síly F_{om} vyvíjené páskem při jeho ohřevu neroste přímo úměrně s rostoucím oteplením. S rostoucím oteplením růst síly F_{om} postupně zpomaluje a změřená charakteristika $F_{om} = f(\Delta T)$ se tedy postupně odklání od teoretické (správné) charakteristiky $F_{os} = f(\Delta T)$, přičemž při ohřevu proudem $I = 262,5$ A je odklon charakteristik větší než při ohřevu proudem $I = 325$ A. Příčinou tohoto odklání je postupné vlastní zkracování použitého tenzometrického snímače síly S2 vlivem rostoucí (na něj působící) síly F_{om} vyvíjené páskem. Pásek tedy v průběhu měření nebyl zcela zafixován v původní přímé poloze a jeho průhyb tak nebyl zcela omezen. Z tohoto důvodu se také změřená charakteristika $F_{om} = f(\Delta T)$ při ohřevu liší od změřené charakteristiky $F_{om} = f(\Delta T)$ při chladnutí pásku. S klesajícím oteplením při chladnutí se snímač S2 naopak postupně prodlužuje vlivem klesající (na něj působící) síly vyvíjené páskem a přes táhlo působí protisilou na pracovní konec pásku, čímž zmenšuje měřenou sílu F_{om} vyvíjenou páskem. Celková změřená závislost $F_{om} = f(\Delta T)$ proto tvoří určitou hysterezní smyčku.

Až při ohřevu pásku proudem $I = 470$ A (Obr. 36) se v měřeném rozsahu síly (0 ÷ 10) N změřená charakteristika $F_{om} = f(\Delta T)$ blíží teoretické charakteristice $F_{os} = f(\Delta T)$. Změřená hodnota síly F_{om} se pak pro dané oteplení při ohřevu liší od teoretické hodnoty F_{os} o (0,3 ÷ 56,6) % a při následném chladnutí jen o (0,7 ÷ 56,2) %.

Příčina závislosti změřené charakteristiky $F_{om} = f(\Delta T)$ při ohřevu pásku na velikosti proudu protékajícího jističem není v tuto chvíli zcela známa a pracuje se na jejím odhalení.

4.4.3 Měření průhybu bimetalu v závislosti na protisíle při konstantní teplotě

Z naměřených hodnot (příloha C) a sestrojené grafické závislosti (Obr. 38) jde vidět, že se zvětšujícím se posuvem pohyblivého ramene stojanu SLJ směrem do koncové polohy a tedy s rostoucí velikostí síly F_m působící na pasivní vrstvu pracovního konce (při silovém působení proti směru přirozeného tepelného průhybu pásku) přímo úměrně roste také průhyb A_{mm} pásku. Směrnice změřené charakteristiky $A_{mm} = f(F_m)$ se však liší od směrnice teoretické (správné) charakteristiky $A_{ms} = f(F_m)$, získané z analytického návrhu. Navíc změřená závislost $A_{mm} = f(F_m)$ při posuvu ramene směrem do koncové polohy se liší od změřené závislosti $A_{mm} = f(F_m)$ při posuvu ramene směrem zpět do výchozí polohy. Celková změřená závislost $A_{mm} = f(F_m)$ tedy tvoří hysterezní smyčku. Příčinou je nelinearita typu vůle v převodech pohyblivého ústrojí (závitové tyče) stojanu SJL.

Změřená hodnota průhybu A_{mm} se pro danou velikost síly F_m působící na pracovní konec liší od teoretické hodnoty A_{ms} o $(0 \div 100) \%$ při posuvu ramene směrem do koncové polohy a o $(17,7 \div 12610,4) \%$ při posuvu ramene směrem zpět do výchozí polohy. Jak jde vidět, závislost $A_{mm} = f(F_m)$ je při obou směrech posuvu pohyblivého ramene schodovitá vlivem tření v pohyblivém ústrojí stojanu SJL. Pro vykonání průhybu (prvního schodu) rovného pásku je třeba překonat jisté pásmo necitlivosti (tření), tedy počáteční sílu $F_m = 0,3 \text{ N}$.

Na Obr. 39 jde vidět, že změřená hodnota průhybu A_{mm} při silovém působení na aktivní vrstvu pásku, tedy ve směru jeho přirozeného tepelného průhybu, je pro každou velikost síly F_m působící na pracovní konec menší než změřená hodnota průhybu A_{mm} při silovém působení na pasivní vrstvu, tedy proti směru přirozeného tepelného průhybu. Hysterezní smyčka je v tomto případě širší než při silovém působení proti směru průhybu. Pro vykonání průhybu (prvního schodu) rovného pásku je třeba překonat počáteční sílu $F_m = 1,1 \text{ N}$. Z toho vyplývá, že hlavní příčinou odlišného tvaru charakteristiky $A_{mm} = f(F_m)$ pro daný směr silového působení jsou rozdílné mechanické vlastnosti pásku v závislosti na směru jeho ohybu.

4.4.4 Chyby měření

Měření je zatíženo následujícími chybami:

- Při měření volného průhybu v závislosti na oteplení nebyly hodnoty DC napětí reprezentující okamžitou detekovanou vzdálenost l terčíku na digitálním multimetru Fluke 8845A odečítány v naprosto stejném časovém okamžiku

vzhledem k hodnotám teploty T_a , T_b a T_0 odečítaných na měřicí ústředně Almemo 5690-2M.

- Při měření volného průhybu i síly v závislosti na oteplení nastavená velikost proudu protékajícího jističem v průběhu měření mírně klesala vlivem postupného nárůstu oteplení proudovodné dráhy a byla tedy v určitých časových intervalech manuálně nastavována na původní hodnotu. Z toho důvodu nejsou změřené oteplovací charakteristiky (Obr. 30) zcela „hladké“ a jejich průběh je složen z několika dílčích, na sebe nasuperponovaných oteplovacích charakteristik.
- Nerovnoměrné rozložení teploty v bimetalu při ohřevu proudem. Při vyhodnocení měření je uvažováno, že teplota T celého bimetalu je aritmetickým průměrem změřené teploty pracovního T_a a pevného T_b konce.
- Výrobce pásku udává, že pásek je rovný při teplotě $T = 20\text{ °C}$. Při této teplotě je jeho průhyb nulový. V tomto měření je uvažováno, že pásek je rovný při každé teplotě bimetalu „za studena“ ($T_a \approx T_b \approx T_0 \approx T_{\text{poč}}$), tedy bez předchozího proudového zatížení.
- Nulování v programu catman Easy při měření síly. Aby byla na počátku každého měření zajištěna přiléhavost táhla snímače síly k pracovnímu konci bimetalu, bylo nutné vyvinout velmi malé, avšak nenulové ($F < 0,1\text{ N}$), silové působení táhla na pracovní konec pásku. Tato nastavená velikost síly byla v programu vynulována, a stanovena jako počáteční vztažná hodnota.
- Přesnost měřicí metody. Jak již bylo popsáno v kapitole 4.1.1, chybou při měření volného průhybu v závislosti na oteplení (v tomto případě však zanedbatelnou) je skutečnost, že v celém měřeném rozsahu (tedy $0 \div 3\text{ mm}$) je uvažováno, že průhyb terčíku odpovídá skutečnému průhybu bimetalu. V případě měření síly vyvíjené páskem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu se jedná o vlastní zkracování tenzometrického snímače síly S2. V případě měření průhybu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec pak o tření a vůli v převodech pohyblivého ústrojí stojanu SLJ.
- Přesnost samotných měřicích přístrojů.

5 NUMERICKÝ MODEL CHOVÁNÍ BIMETALU

Cílem této kapitoly je vytvoření numerického modelu chování bimetalu TB 185/08 v termomagnetické nadproudové spoušti TM240, obsažené v jističi Sentron 3VA12. Jedná se o simulaci oteplení a volného průhybu bimetalu při ohřevu mezními proudy $I_{nt} = 1,05 \times I_n = 262,5 \text{ A}$ a $I_t = 1,3 \times I_n = 325 \text{ A}$ v ustáleném stavu.

5.1 Vytvoření numerického modelu v programu SolidWorks

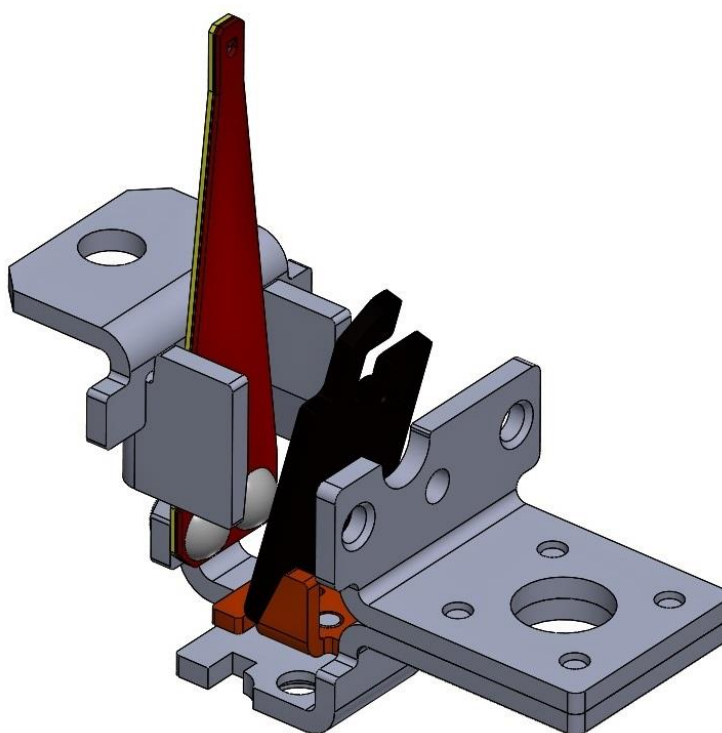
Numerický model byl vytvořen v programu SolidWorks. Jedná se o strojírenský CAD software vyvinutý společností Dassault Systèmes, zahrnující nástroje pro 3D modelování, sestavy, výkresy, plechové součásti, svařované konstrukce a další [22].

V prostředí programu byl dle skutečných dílců (*Obr. 17*) vytvořen 3D model jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240. Postup modelování byl následující:

- V šabloně „Díl“ byly s využitím základních kreslicích nástrojů programu postupně namodelovány jednotlivé vrstvy bimetalu TB 185/08 ve 3D (aktivní, pasivní i měděná mezivrstva). Každé vrstvě pak byl přiřazen odpovídající materiál dle *Tab. 3* (aktivní vrstva – slitina MnCu18Ni10, pasivní vrstva – slitina FeNi36). Nutno zdůraznit, že mechanické i tepelné vlastnosti materiálu aktivní vrstvy – speciální slitiny MnCu18Ni10, důležité pro následnou simulaci průhybu pásku, nebyly ani po usilovné snaze nalezeny. Jedinou dohledanou vlastností této slitiny je teplotní součinitel délkové roztažnosti α . Podobným materiálem používaným na aktivní vrstvy je podle kapitoly 2.2 monel (slitina NiCu). V programu byl proto aktivní vrstvě pásku TB 185/08 přiřazen monel s nadefinovaným součinitelem délkové roztažnosti α slitiny MnCu18Ni10. Vliv na chování numerického modelu bude mít také skutečnost, že tloušťka (s_1, s_2, s_3) jednotlivých vrstev v celkové tloušťce s pásku není přesně známa. Na základě celkové známé tloušťky pásku $s = 1,2 \text{ mm}$ a informací o výrobě a materiálu bimetalu uvedených v [1], byla zvolena tloušťka aktivní i pasivní vrstvy $s_1 = s_2 = 0,5 \text{ mm}$ a měděné mezivrstvy $s_3 = 0,2 \text{ mm}$.
- Do šablony „Sestava“ byly postupně vloženy jednotlivé namodelované vrstvy bimetalu. Vložené vrstvy pak byly odpovídajícím způsobem spojeny do jednoho celku (sestavy). V šabloně byl tedy namodelován celý bimetalový pásek TB 185/08.
- V šabloně „Díl“ byly s využitím základních kreslicích nástrojů programu postupně namodelovány ostatní části proudovodné dráhy jednoho pólu spouště včetně jha a kotvy elektromagnetu zkratové spouště. Každé součásti pak byl

přiřazen odpovídající materiál (proudovodná dráha – postříbřená měď; nýty spojující bimetal a jho elektromagnetu s proudovodnou dráhou – uhlíková ocel; jho a kotva elektromagnetu – železo).

- Do šablony „Sestava“ byly postupně vloženy jednotlivé namodelované části proudovodné dráhy včetně jha a kotvy elektromagnetu zkratové spouště a také již namodelovaný bimetalový pásek TB 185/08. Vložené součásti pak byly odpovídajícím způsobem spojeny do jednoho celku (sestavy). V šabloně byl tedy namodelován celý jeden pól termomagnetické nadproudové spouště TM240 (Obr. 40) a je součástí přílohy D této práce.



Obr. 40: Model jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240, vytvořený v programu SolidWorks

5.2 Simulace ustáleného oteplení bimetalu

Simulace ustáleného oteplení je provedena na vytvořeném modelu (Obr. 40) jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240 v doplňkovém modulu SolidWorks Flow Simulation. Tento modul slouží zejména k simulaci proudění kapalin a přenosu tepla. K tomu využívá metodu konečných objemů (MKO), kdy se řešená oblast rozdělí na konečný počet objemů pomocí diskretizační sítě a v těchto objemech probíhá numerické řešení dané úlohy. [23]

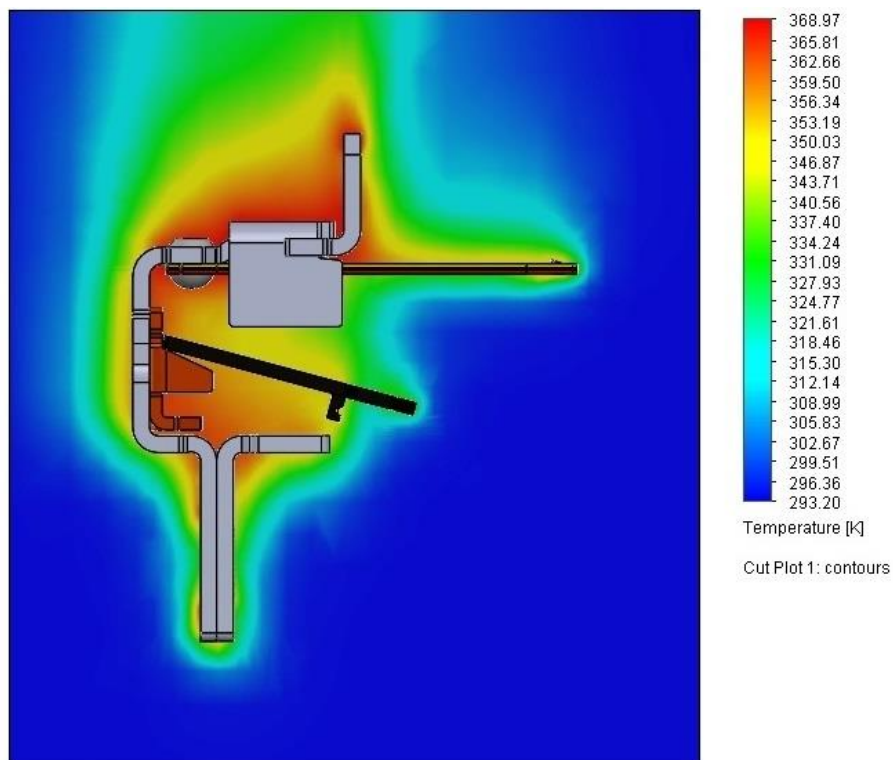
5.2.1 Nastavení vstupních parametrů simulace

Pro ohřev každým zatěžovacím proudem ($I = 262,5 \text{ A}$ a $I = 325 \text{ A}$) byla v prostředí modulu SolidWorks Flow Simulation vytvořena samostatná studie. Pro správný výpočet simulace proudění tepla bylo v prostředí modulu Flow Simulation nutné nastavit okrajové podmínky a vstupní parametry tak, aby se simulace částečně přiblížila reálnému prostředí při měření podle kapitoly 4.1. Postup byl následující:

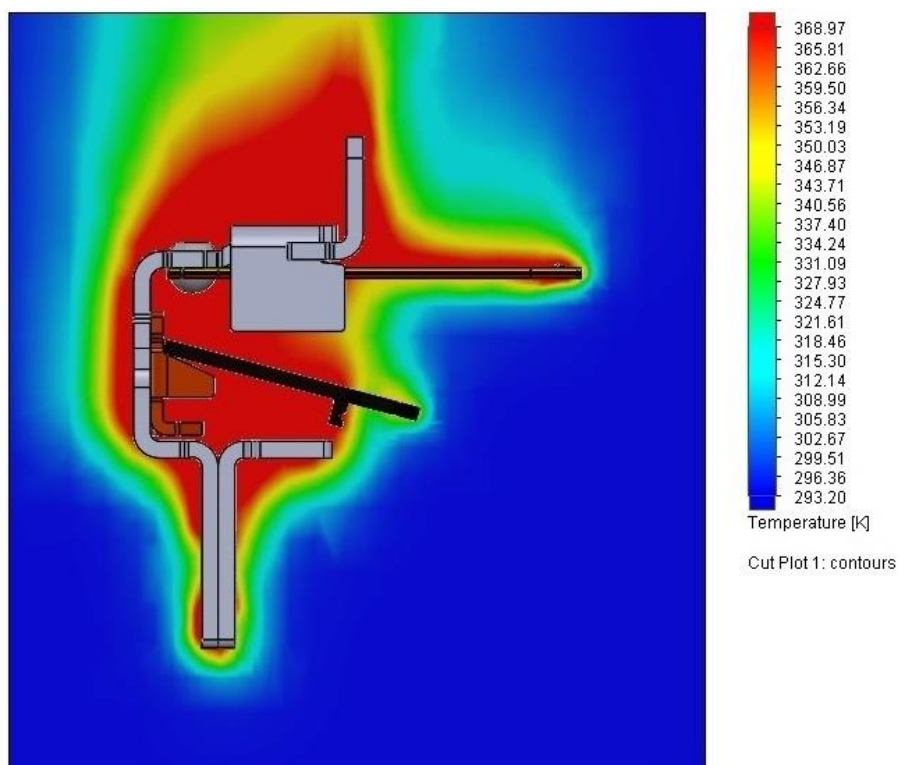
- V průvodci nastavení parametrů Flow Simulation byly postupně nastaveny základní parametry simulace – systém jednotek, způsob proudění, gravitace s ohledem na pracovní polohu spouště, proudící médium, defaultní materiál a jeho vlastnosti, termodynamické a objemové parametry (tlak, vlhkost, počáteční teplota okolí) a přesnost výsledku (jemnost diskretizační sítě).
- Velikost výpočtové oblasti byla nastavena taková, aby oblast pokrývala celý model nadproudové spouště.
- Jednotlivým dílům modelu nadproudové spouště v modulu Flow Simulation byl přiřazeny odpovídající materiály v souladu s materiály použitými v samotném modelu (kapitola 5.1).
- Z důvodu uvažování přestupu tepla zářením byl jednotlivým povrchům modelu přiřazen součinitel teplotního záření (emisivita) odpovídající materiálu daného povrchu.
- Oběma svorkám modelu nadproudové spouště byly přiřazeny elektrické podmínky – vstupní a výstupní elektrický proud.
- Byly definovány konkrétní cíle simulace, tedy místa snímání teploty. Dva měřicí body byly umístěny přibližně do míst, ve kterých probíhalo reálné měření teploty (Obr. 25), tedy na povrch pasivní vrstvy pracovního a pevného konce pásku. Další bod byl pak umístěn mezi tyto dva body, tedy do středu pasivní vrstvy pásku.
- Po nastavení všech výše uvedených vstupních parametrů byl spuštěn výpočet simulace.

I při nastavení výše uvedených okrajových podmínek a vstupních parametrů se však simulace oproti reálnému prostředí při měření liší. Kromě již zmíněného materiálu aktivní vrstvy bimetalu a tloušťky jednotlivých vrstev bimetalu (kapitola 5.1) se zde jedná zejména o tepelnou izolaci nadproudové spouště. Zatímco při reálném měření oteplení bimetalu (kapitola 4.1) byl měřený pól tepelně izolován od okolního prostředí vlastním plastovým krytem spouště a také izolační lepicí páskou, v simulaci je model tohoto pólu umístěn do prostoty s okolním vzduchem bez tepelné izolace. Dále na rozdíl od reálného měření nejsou v simulaci uvažovány tepelné a přechodové odpory ostatních částí proudovodné dráhy jističe. Nastavené vstupní parametry simulace jsou uvedeny v příloze D této práce.

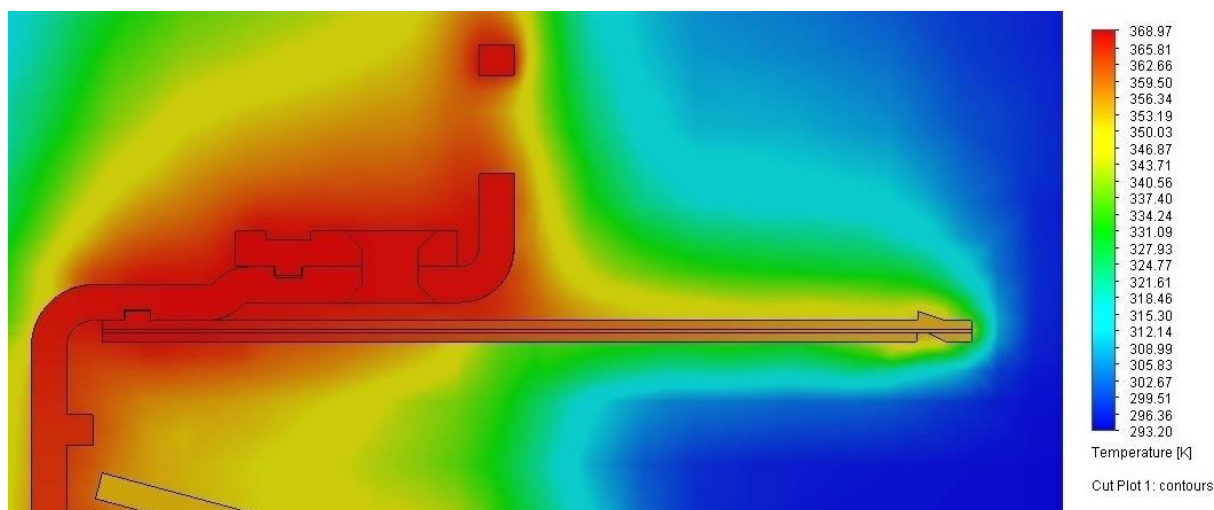
5.2.2 Výsledky simulace



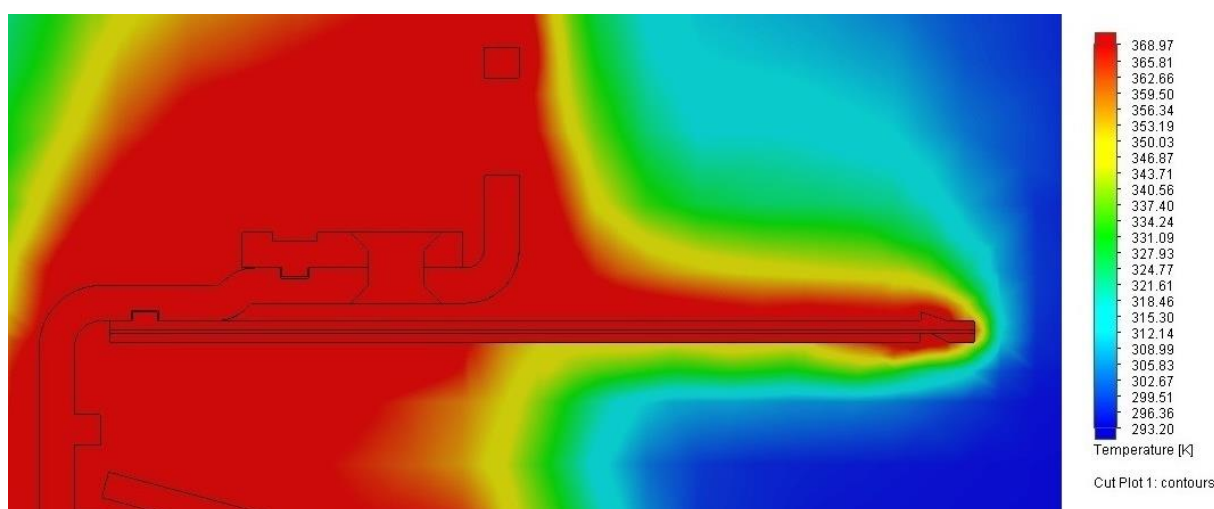
Obr. 41: Simulace ustáleného oteplení jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240 při ohřevu proudem $I = 262,5 \text{ A}$



Obr. 42: Simulace ustáleného oteplení jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240 při ohřevu proudem $I = 325 \text{ A}$



Obr. 43: Simulace ustáleného oteplení bimetalu TB 185/08 při ohřevu proudem $I = 262,5$ A



Obr. 44: Simulace ustáleného oteplení bimetalu TB 185/08 při ohřevu proudem $I = 325$ A

5.3 Simulace volného průhybu bimetalu

Simulace je provedena na vytvořeném modelu (Obr. 40) jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240 v doplňkovém modulu SolidWorks Simulation. Jedná se o simulaci volného průhybu odpovídajícího ustálenému oteplení při ohřevu zatěžovacími proudy $I = 262,5$ A a $I = 325$ A.

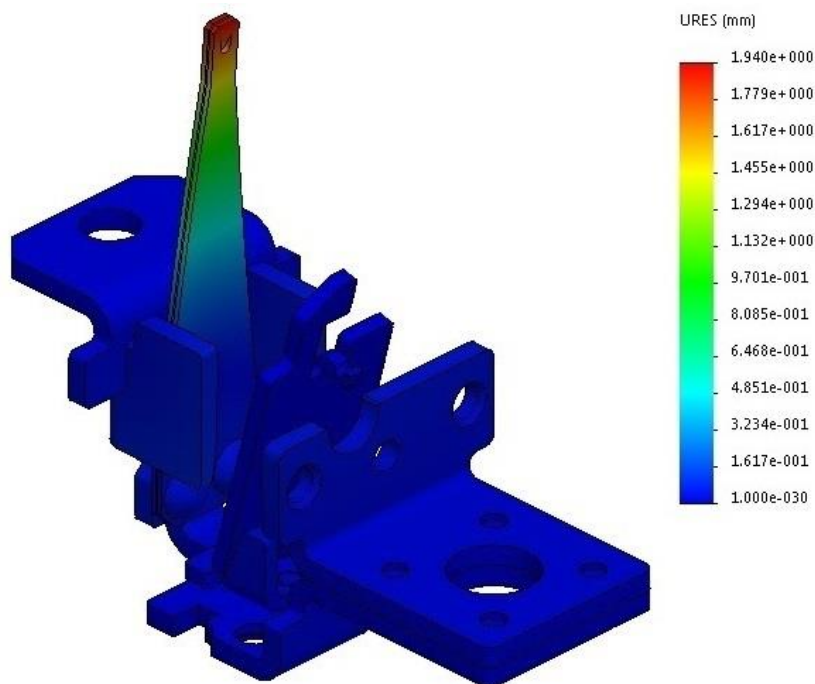
5.3.1 Nastavení vstupních parametrů simulace

Pro ohřev každým zatěžovacím proudem ($I = 262,5$ A a $I = 325$ A) byla v prostředí modulu SolidWorks Simulation vytvořena samostatná statická studie, která slouží k analýze napětí, posunů a poměrných deformací pro součásti s lineárními materiály [23]. Vstupní parametry byly nastaveny tak, aby se simulace průhybu přiblížila reálnému prostředí při měření. Postup byl následující:

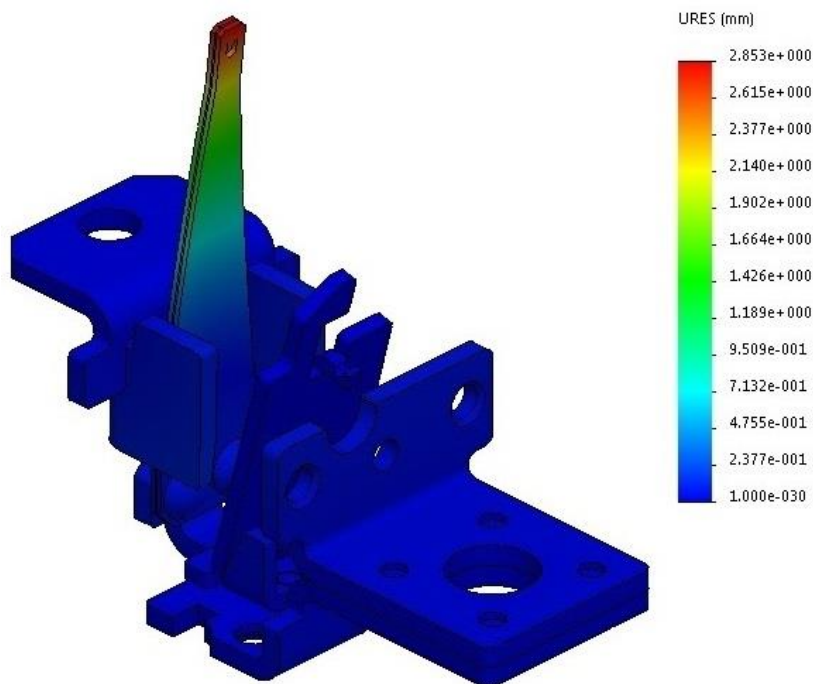
- Jako externí zatížení statické studie byly použity tepelné účinky získané z předchozí simulace oteplení pomocí modulu SolidWorks Flow Simulation (kapitola 5.2).
- Jednotlivým dílům modelu nadproudové spouště v modulu SolidWorks Simulation byl přiřazen odpovídající materiál v souladu s materiály použitými v samotném modelu (kapitola 5.1).
- Model nadproudové spouště byl uchycen pomocí přírodních svorek, které byly použity jako fixní referenční geometrie.
- Byla definována kompatibilní síť mezi dotýkajícími se součástmi modelu.
- Na základě nastavených parametrů byla vytvořena diskretizační síť modelu.
- Po nastavení všech výše uvedených vstupních parametrů byl spuštěn výpočet simulace.

Nastavené vstupní parametry simulace jsou uvedeny v příloze D této práce.

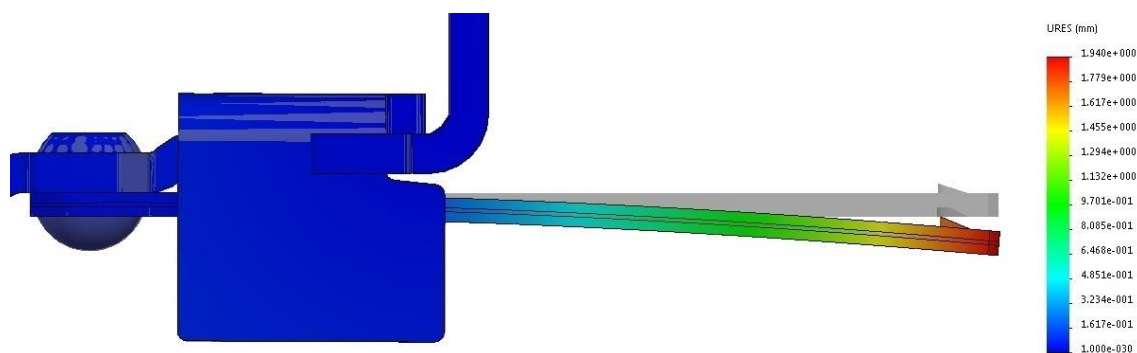
5.3.2 Výsledky simulace



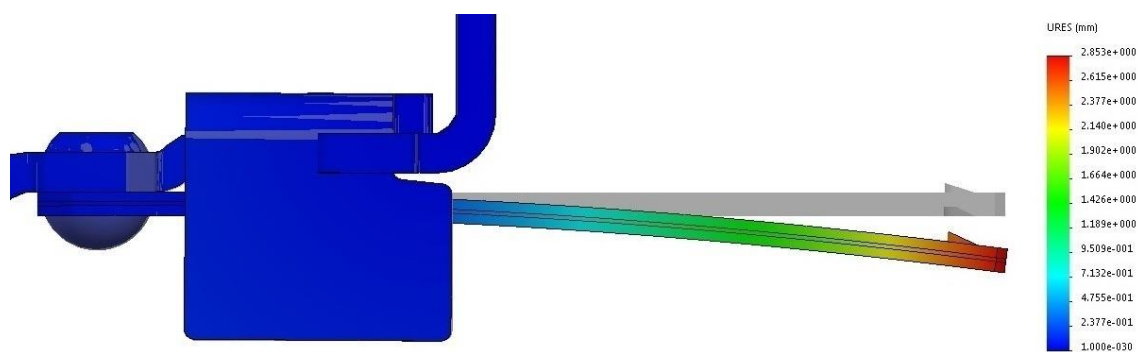
Obr. 45: Simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 262,5 \text{ A}$



Obr. 46: Simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 325 \text{ A}$



Obr. 47: Detail simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 262,5 \text{ A}$



Obr. 48: Detail simulace průhybu bimetalu TB 185/08 při ustáleném oteplení a ohřevu proudem $I = 325 \text{ A}$

5.4 Zhodnocení simulace

Na *Obr. 41* a *Obr. 42* je pro ohřev jednotlivými zatěžovacími proudy ($I = 262,5$ A a $I = 325$ A) znázorněno celkové rozložení teploty kolem modelu jednoho pólu nadproudové spouště TM240 v ustáleném stavu, na *Obr. 43* a *Obr. 44* pak celkové rozložení teploty uvnitř samotného bimetalu TB 185/08.

Z výsledku simulace (příloha D) ustáleného oteplení v nadefinovaných bodech odpovídajících bodům reálného měření teploty (*Obr. 25*) jde vidět, že při ohřevu proudem $I = 262,5$ A je ustálené oteplení pracovního konce $\Delta T_{a_max} = 61,97$ K, pevného konce $\Delta T_{b_max} = 75,14$ K a ustálené oteplení uprostřed pásku $\Delta T_{max} = 69,43$ K. Změřené hodnoty ustáleného oteplení při ohřevu tímto proudem podle *Obr. 30* a kapitoly 4.4.1 jsou $\Delta T_{a_max} = 62,5$ K, pevného konce $\Delta T_{b_max} = 74,9$ K a z toho vypočtené průměrné ustálené oteplení $\Delta T_{max} = 68,7$ K. Z výsledků simulace volného průhybu bimetalu (*Obr. 45* a *Obr. 47*) jde vidět, že ustálenému oteplení při ohřevu proudem $I = 262,5$ A odpovídá volný průhyb $A_{v_max} = 1,94$ mm. Změřený volný průhyb odpovídající ustálenému oteplení při ohřevu tímto proudem podle *Obr. 31* a kapitoly 4.4.1 je $A_{vm_max} = 1,97$ mm.

Z výsledku simulace (příloha D) ustáleného oteplení v nadefinovaných bodech odpovídajících bodům reálného měření teploty (*Obr. 25*) jde vidět, že při ohřevu proudem $I = 325$ A je ustálené oteplení pracovního konce $\Delta T_{a_max} = 90,21$ K, pevného konce $\Delta T_{b_max} = 111,18$ K a ustálené oteplení uprostřed pásku $\Delta T_{max} = 102,03$ K. Změřené hodnoty ustáleného oteplení při ohřevu tímto proudem podle *Obr. 30* a kapitoly 4.4.1 jsou $\Delta T_{a_max} = 92,5$ K, pevného konce $\Delta T_{b_max} = 113,9$ K a z toho vypočtené průměrné ustálené oteplení $\Delta T_{max} = 103,2$ K. Z výsledků simulace volného průhybu bimetalu (*Obr. 46* a *Obr. 48*) jde vidět, že ustálenému oteplení při ohřevu proudem $I = 325$ A odpovídá volný průhyb $A_{v_max} = 2,85$ mm. Změřený volný průhyb odpovídající ustálenému oteplení při ohřevu tímto proudem podle *Obr. 31* a kapitoly 4.4.1 je $A_{vm_max} = 2,98$ mm.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro ohřev proudem $I = 262,5$ A se simulované ustálené oteplení v jednotlivých měřicích bodech (ΔT_{a_max} a ΔT_{b_max}) neliší od změřeného o více než 1 K, při ohřevu proudem $I = 325$ A pak o 3 K. Dále pro ohřev proudem $I = 262,5$ A se simulovaný volný průhyb A_{v_max} odpovídající ustálenému oteplení liší od změřeného pouze o 0,03 mm, při ohřevu proudem $I = 325$ A pak o 0,13 mm.

I přes odlišné okrajové podmínky a vstupní parametry simulací (kapitola 5.2.1) oproti reálnému prostředí při měření lze konstatovat, že výsledky získané simulacemi odpovídají s velkou přesností výsledkům získaným měřeními a tedy i výsledkům získaným z analytického návrhu.

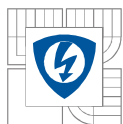
6 ZÁVĚR

Cílem první části této práce bylo podle zadání popsat princip tepelné (bimetalové) spouště včetně možných konstrukčních řešení. Při zpracování byl přitom kladen důraz na samotný bimetal, jakožto základní konstrukční prvek tepelné spouště. Kromě principu činnosti bimetalu a materiálů vhodných k jeho výrobě, zde proto byly uvedeny a podrobně rozebrány parametry bimetalu nutné k návrhu. V této části byly také popsány základní principy výpočtu bimetalového prvku. Byl zde uveden přehled užitečných matematických vztahů pro výpočet v praxi nejčastěji používaných řešení.

V následující části byl podle zadání zpracován analytický návrh bimetalové spouště pro bimetal TB 185/08 obsažený v termomagnetické nadproudové spoušti TM240 kompaktního jističe Sentron 3VA12 od společnosti Siemens. V rámci analytického návrhu byl teoreticky určen volný průhyb bimetalového pásku (bez působení protisíly vybavovacího mechanismu nadproudové spouště) v závislosti na oteplení, dále síla vyvíjená páskem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu, síla vyvíjená páskem v závislosti na částečně omezeném průhybu při konstantní teplotě a průhyb pásku v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě. Návrh byl vypracován na základě parametrů udávaných výrobcem pásku a výpočetních vztahů uvedených v předchozí části práce.

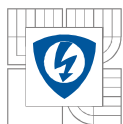
Třetím bodem zadání je ověření předchozího návrhu měřením. Proto byla změřena závislost volného průhybu bimetalu TB 185/08 na oteplení, závislost síly vyvíjené páskem na oteplení při zcela omezeném průhybu a závislost průhybu pásku na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě. Byl zde podrobně popsán celý postup tohoto měření. V závěru této části bylo provedeno zhodnocení měření, ve kterém byly naměřené hodnoty porovnány s hodnotami získanými z analytického návrhu.

V závěrečné části byl v programu SolidWorks vytvořen numerický model jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240, na kterém byla provedena simulace ustáleného oteplení a tomu odpovídajícího volného průhybu bimetalu TB 185/08. Výsledky získané simulací pak byly porovnány s výsledky získanými měřením a s výsledky získanými z analytického návrhu.



LITERATURA

- [1] UHLIG, Wolfgang. *Thermostatic Metal: Manufacture and Application*. 2. vyd. Aue/Sachsen (Germany): Auerhammer Metallwerk GmbH, 2007. OCLC 316051590.
- [2] *Thermostatic Bimetal Handbook* [online]. Hallstahammar (Sweden): Kanthal AB, 2008 [cit. 2014-11-21].
Dostupné z: <http://www.kanthal.com/Global/Downloads/Materials%20in%20wire%20and%20strip%20form/Thermostatic%20bimetal/Bimetal%20handbook%20ENG.pdf>
- [3] *Thermostatic bimetals handbook*. Nové Dillí (Indie): Shivalik Bimetal Controls. ISBN SB/HB/1101
- [4] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988.
- [5] FALTUS, Ivo. *Příručka elektrotechnika I*. Letohrad: OEZ, 2011. ISBN JP2-2011-C.
- [6] *3VA Molded Case Circuit Breakers* [online]. 2014. Regensburg (Germany): Siemens AG, Infrastructure & Cities Sector Low and Medium Voltage Division Low Voltage & Products [cit. 2015-04-05]. ISBN E86060-K8220-E480-A3-7600.
Dostupné z: https://www.cee.siemens.com/web/ua/ru/low-voltage/download/Documents/3VAMoldedCaseCircuitBreakers_EN_3152.pdf
- [7] *Příručka: Nadproudové spouště* [online]. Letohrad: OEZ, 2012 [cit. 2014-11-22]. ISBN JS1-2012-C. Dostupné z: <http://www.oez.cz/file/595/download/>
- [8] *Kompaktní jističe Modeion* [online]. Letohrad: OEZ, 2013 [cit. 2014-11-22]. ISBN J1-2013-C. Dostupné z: <http://www.oez.cz/file/366/download/>
- [9] Klešťový proudový adaptér Chauvin Arnoux AmpFLEX A050: Popis a parametry. © 2015. Conrad [online]. Conrad Electronic Česká republika [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/klestovy-proudovy-adapter-chauvin-arnoux-ampflex-a050.k124182>
- [10] Digitální multimetr Hexagon - Amprobe 340A: Technické údaje. © 2011. AMT měřicí technika: *Single Point of Contact One Face to the Customer* [online]. AMT měřicí technika [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.amt.cz/index.php?id=HEX340>
- [11] PSM 3/5A: technický popis. © 1991-2015. GES-ELECTRONICS [online]. GES-ELECTRONICS [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/psm-3-5a-GES07507321.html>
- [12] 8845A/8846A 6.5 Digit Precision Multimeters: Technical Specifications. © 1995-2015. FLUKE: *Keeping your world up and running* [online]. Fluke [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://en-us.fluke.com/products/bench-instruments/8845a-8846a-6-5-digit-precision-multimeters.html#techspecs>



-
- [13] *Installation Instructions Bulletin 45BRD Analog Laser Sensor* [online]. 2006. Rockwell Automation, Allen-Bradley [cit. 2015-04-14]. ISBN [068-13805]. Dostupné z: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/45brd-in001_-en-p.pdf
- [14] *MĚŘICÍ ÚSTŘEDNA ALMEMO 5690-2M* [online]. 2009. Praha: AHLBORN měřicí a regulační technika [cit. 2015-04-14]. ISBN [068-13805]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.cz/out/pictures/wysiwigpro/ALMEMO%205690-2M-bc.pdf>
- [15] Connector for DCV signals, ZA9000-FS3 ALMEMO: Technical features. © 2013-2014. *Loging Electronics* [online]. Loging Electronics [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: http://www.logingel.com/1629/182739/0/ShowProduct/Connector_for_DCV_signals
- [16] Termočlánky - snímače pro měření teploty: Rozsahy termočlánků a přesnosti. © 1995-2012. *Omegaeng.cz: Váš zdroj informací o měření a regulaci* [online]. JAKAR Electronics [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- [17] *S2 Force Transducers Data Sheet* [online]. Darmstadt (Germany): Hottinger Baldwin Messtechnik [cit. 2015-04-14]. ISBN D 20.S2.22 en. Dostupné z: http://www.hbm.cz/Prospekty/Sila/S2/p_S2_e.pdf
- [18] *QuantumX: Operating Manual* [online]. Darmstadt (Germany): Hottinger Baldwin Messtechnik [cit. 2015-04-14]. ISBN I3031-5.0 en. Dostupné z: http://www.rcmt.cvut.cz/soubor/f-at/70d22ce0-ed75-4732-b516-2d6b3fa0b28b/4/quantum_mx840-manual-eng.pdf
- [19] *Hottinger Baldwin Messtechnik: měřicí technika* [online]. Praha: HBP měřicí technika [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/>
- [20] Manuální stojan SLJ: Popis. © 2009. *Natis - měřicí přístroje a systémy* [online]. Kroměříž: NATIS [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.natis.cz/manualni/manualni-stojan-slj.htm#>
- [21] Magnetický snímač TMLS-05A-05: Technická specifikace. © 2005-2012. *Jirka a spol.: Měřicí technika* [online]. SolarisMedia.net [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.jirkaspol.cz/magneticky-snimac-tmls-05a-05.html>
- [22] *DASSAULT SYSTEMES: PRODUKTY A SLUŽBY* [online]. Dassault Systèmes, © 2002-2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.3ds.com/cz-cz/produkty-a-sluzby/>
- [23] *MůjSolidWorks.cz* [online]. Brno: SolidVision, © 2014 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://mujsolidworks.cz/>

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

Tabulky naměřených a vypočtených hodnot (elektronická verze)

Příklad výpočtu

Fotografie měření

Příloha B – Měření síly vyvíjené bimetalem v závislosti na oteplení při zcela omezeném průhybu

Tabulky naměřených a vypočtených hodnot (elektronická verze)

Příklad výpočtu

Fotografie měření

Příloha C – Měření průhybu bimetalu v závislosti na protisíle působící na jeho pracovní konec při konstantní teplotě

Tabulky naměřených a vypočtených hodnot (elektronická verze)

Příklad výpočtu

Fotografie měření

Příloha D – Simulace oteplení a volného průhybu bimetalu (elektronická verze)

Model jednoho pólu termomagnetické nadproudové spouště TM240

Vstupní parametry a výsledky simulace oteplení bimetalu

Vstupní parametry a výsledky simulace volného průhybu bimetalu