

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016

Stanislav Marek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

TEPELNÁ SPOUŠŤ VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH

THERMAL OVERLOAD TRIP UNIT IN ELECTRICAL SWITCHING DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Marek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Zelenka

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Stanislav Marek

ID: 158193

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Tepelná spoušť ve spínacích přístrojích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip tepelné nadproudové spouště a možná konstrukční řešení.
2. Uveďte požadavky kladené na bimetalový prvek jakožto základní konstrukční prvek spouště.
3. Proveďte výpočet bimetalu v konkrétním spínacím přístroji nn.
4. Výpočet ověřte měřeními a získané výsledky vyhodnotte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1988
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] UHLIG, W. Thermostatic Metal: Manufacture and Application, 2007

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Michal Zelenka

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o časově závislé tepelné spoušti v samočinných spínacích přístrojích. V první části se zabývá principem činnosti tepelné nadproudové spouště a možných konstrukčních řešení. Největší důraz je zde kladen na bimetál jako na základní konstrukční prvek tepelné nadproudové spouště. Mimo materiálů, které jsou nejvhodnější k výrobě bimetálu, jsou zde také podrobně analyzovány parametry bimetálu potřebné k jeho návrhu. Dále nás práce seznamuje s elementárními výpočty bimetalového prvku a souhrnem matematických vztahů pro výpočet nejčastěji používaných řešení. Převážná část této práce se zabývá teoretickým výpočtem tepelné spouště v předem určeném jističi pro zadaný typ bimetálu a požadované vypínací charakteristiky. Předem stanovený výpočet je následně ověřen měřením. Jedná se především o měření volného průhybu bimetálu v závislosti na oteplení. V poslední části této práce je provedeno vyhodnocení výsledků získaných z teoretického výpočtu s výsledky získanými měřením.

Abstract

This bachelor thesis revolves around a time dependent thermal overload trip unit inside automated switching mechanisms. The first part addresses the principle of the function of a thermal overcurrent trip unit and the possible construction solutions. The biggest emphasis is given to bimetall as a base construction feature of the thermal overcurrent trip unit. Besides the materials that are most suitable for the creation of bimetall, various bimetall parameters that are needed for its design are also analyzed. The next subject of the thesis is an introduction to the elemental calculations for the bimetall component and the summary of mathematical relations for the calculation of the most commonly used solutions. A predominant part of this thesis revolves around the theoretical calculation of the thermal overload trip in a previously established circuit breaker for a specific type of the bimetall and a specific required tripping characteristic. The previously established calculation is then verified by measuring. The measuring itself consists of the measurement of the free bending of the bimetall in dependence on heat. The last part of this thesis includes the assessment of the results calculated from the theoretical standpoint, compared with the results given by the measurement.

Klíčová slova

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

Keywords

Overcurrent trip unit; Thermal overload trip unit; Thermostatic bimetal; Molded case circuit breaker; Measurement

Bibliografická citace

MAREK, S. *Tepelná spoušť ve spínacích přístrojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Zelenka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tepelná spoušť ve spínacích přístrojích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské práce Ing. Michalu Zelenkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 ÚVOD	13
2 TEPELNÁ SPOUŠŤ VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH	14
2.1 PRINCIP ČINNOSTI TEPELNÉ NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ	14
2.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ TEPELNÝCH NADPROUDOVÝCH SPOUŠTÍ	14
2.3 PRINCIP ČINNOSTI BIMETALU	15
2.4 MATERIÁLY BIMETALU	16
2.5 PARAMETRY BIMETALU	18
2.5.1 MĚRNÁ TEPELNÁ KŘIVOST	18
2.5.2 MĚRNÝ TEPELNÝ PRŮHYB	20
2.5.3 MAXIMÁLNÍ PROVOZNÍ TEPLOTA	20
2.5.4 ROZMEZÍ LINEARITY	21
2.5.5 MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	22
2.5.6 MĚRNÝ ELEKTRICKÝ ODPOR.....	23
2.5.7 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	25
2.5.8 TEPELNÁ VODIVOST	25
2.5.9 TEPELNÉ ZÁŘENÍ	25
2.5.10 DOVOLENÉ NAPĚTÍ V OHYBU	26
2.5.11 TVRDOTA PODLE VICKERSE	26
2.5.12 ODOLNOST PROTI KOROZI.....	27
2.6 VÝPOČET BIMETALU	28
2.6.1 JEDNOSTRANNĚ UPEVNĚNÝ PŘÍMÝ BIMETAL OBDÉLNÍKOVÉHO TVARU	28
2.6.2 JEDNOSTRANNĚ UPEVNĚNÝ PŘÍMÝ BIMETAL ZKOSENÉHO TVARU.....	30
2.7 VYPÍNAČÍ CHARAKTERISTIKA TEPELNÉ NADPROUDOVÉ SPOUŠTĚ	31
3 VÝPOČET BIMETALU VE SPÍNACÍM PŘÍSTROJI NN	33
3.1 KOMPAKTNÍ JISTIČ X1	33
3.2 VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY PRO VÝPOČET	37
3.3 VÝPOČET VOLNÉHO PRŮHYBU BIMETALU V ZÁVISLOSTI NA OTEPLENÍ	37
4 MĚŘENÍ BIMETALU	40
4.1 MĚŘENÍ VOLNÉHO PRŮHYBU V ZÁVISLOSTI NA OTEPLENÍ	40
4.1.1 PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ	40
4.1.2 POSTUP MĚŘENÍ	41
4.1.3 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	44
4.1.4 ZMĚŘENÉ ZÁVISLOSTI	45
4.1.5 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	47
4.1.6 CHYBY MĚŘENÍ	48
5 ZÁVĚR	49
LITERATURA	50
PŘÍLOHY	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Časově závislá vypínací charakteristika.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2: Jistič s termomagnetickou spouští [7].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3: Princip činnosti bimetalu.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4: Struktura bimetalu 2vrstvy a 3vrstvy. [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5: Struktura bimetalu 4 vrstvy. [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 6: Příklad teplotní závislosti délkové roztažnosti pro koeficienty FeNi36, FeNi42 a FeNi20Mn6 [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7: Příklad teplotní závislosti měrné tepelné křivosti pro koeficienty TB 155/78 (FeNi36/FeNi20Mn6) a TB 115/70.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8: Zakřivení prostě podepřeného bimetalového pásku [2].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 9: Průhyb na jednom konci upevněného bimetalu [2]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 10: Tvrdost podle Vickerse jako funkce teploty a doby trvání [2].....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 11: Rozmezí linearity [2].....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 12: Maximální provozní teplota v rozmezí linearity pro různé druhy bimetalu [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 13: Teplotní závislost modulu pružnosti pro slitiny FeNi20Mn6 a FeNi36 [2].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 14: Teplotní závislost měrného elektrického odporu pro různé typy bimetalu [2]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 15: Příklad závislosti dovoleného ohybového napětí na teplotě [2].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 16: Tvrdost podle Vickerse pro různé slitiny v závislosti na stupni tváření [2]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 17: Ukázka praskliny způsobená korozi účinkem mořského vzduchu.[2].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 18: Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu obdélníkového tvaru.[2].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 19: Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu zkoseného tvaru [2]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 20: Obecná charakteristika jističů podle normy ČSN EN 60947-2 [5]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 21: Kompaktní jistič X1 [8]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 22: Termomagnetická nadproudová spoušť jističe X1 [9]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 23: Jeden pól termomagnetické spouště</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 24: Geometrie bimetalu [1]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 25: Vypínací charakteristika jističe X1 [9].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 26: Teoretická závislost volného průhybu bimetalu Y1 na oteplení.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 27: Rozložení termočlánu na pasivní vrstvě bimetalu Y1 pro měření teploty.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 28: Schéma zapojení pro měření volného průhybu</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 29: Měření volného průhybu bimetalu</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 30: Změřená závislost volného průhybu bimetalu Y1 na oteplení při proudu $I = 227,5 A$... </i>	<i>45</i>



-
- Obr. 31: Změřená závislost volného průhybu bimetalu Y1 na oteplení při proudu $I = 183,75 \text{ A}$.45*
- Obr. 32: Změřená závislost okamžitého průměrného oteplení bimetalu Y1 na čase 46*
- Obr. 33: Změřená závislost volného průhybu bimetalu Y1 na čase 46*



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Meze vypínacích charakteristik podle normy ČSN EN 60947-2 [5]</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 2: Parametry kompaktního jističe XI [1] [9].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 3: Parametry bimetalu Y1 [1] [2]</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 4: Výpočet volného průhybu bimetalu Y1 v závislosti na oteplení.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5: Seznam použitých přístrojů pro měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení</i>	<i>44</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
A	průhyb bimetalu	[mm]
A_u	částečně omezený průhyb bimetalu	[mm]
A_v	volný průhyb bimetalu	[mm]
A_{vm}	měřená hodnota volného průhybu bimetalu	[mm]
A_{vs}	teoretická hodnota volného průhybu bimetalu	[mm]
Δ_A	absolutní chyba měření volného průhybu bimetalu	[mm]
δ_A	relativní chyba měření volného průhybu bimetalu	[%]
a	měrný tepelný průhyb bimetalu	[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]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
E_1	modul pružnosti v tahu aktivní vrstvy	[MPa]
E_2	modul pružnosti v tahu pasivní vrstvy	[MPa]
F_1, F_2	síly vyvolávající ohyb bimetalu	
F_{max}	maximální dovolené síla vyvíjená bimetalem při maximálním ohybovém napětí	[N]
F_o	síla vyvíjena bimetalem při maximálním průhybu při změně teploty	[N]
F_u	síla vyvíjená bimetalem při částečném průhybu	[N]
I	efektivní hodnota elektrického proudu	[A]
I_n	jmenovitý proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
I_{nt}	smluvený nevypínací proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
I_r	redukováný proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
I_t	smluvený vypínací proud jističe (nadproudové spouště)	[A]
k	měrná tepelná křivost bimetalu	[K ⁻¹]
L	aktivní délka bimetalu	[mm]
ΔL_1	prodloužení pasivní vrstvy	[mm]
ΔL_2	prodloužení aktivní vrstvy	[mm]



l	měřená vzdálenost čepičky při měření volného průhybu bimetalu	[mm]
$l_{\text{poč}}$	počáteční měřená vzdálenost čepičky při měření volného průhybu bimetalu	[mm]
m	hmotnost	[g]
P	povrch	[mm ²]
n	součinitel poměru šířky vrstev	[-]
R	elektrický odpor	[Ω]
s	průměrná tloušťka bimetalu	[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 bimetalu	[°C]
T_2	koncová teplota bimetalu	[°C]
ΔT	oteplení	[K]
T_A	poměr oteplení použitého na průhyb bimetalu	[K]
T_F	poměr oteplení použitého na vyvinutí síly bimetalu	[K]
T_a	měřená teplota pracovního konce bimetalu	[°C]
T_b	měřená teplota střední části bimetalu	[°C]
T_c	měřená teplota pevného konce bimetalu	[°C]
t	čas	[s]
V	objem	[mm ³]
V_{min}	minimální objem	[mm ³]
α	teplotní koeficient délkové roztažnosti	[K ⁻¹]
α_1	koeficient teplotní délkové roztažnosti aktivní vrstvy	[K ⁻¹]
α_2	koeficient teplotní délkové roztažnosti pasivní vrstvy	[K ⁻¹]
γ	hustota	[g·cm ⁻³]
ε	teplotní koeficient elektrického odporu	[K ⁻¹]
ρ	měrný elektrický odpor bimetalu	[μΩ·m]
ρ_1	měrný elektrický odpor při teplotě T_1	[μΩ·m]
ρ_2	měrný elektrický odpor při teplotě T_2	[μΩ·m]
σ_{max}	maximální ohybové napětí	[MPa]
ψ	součinitel pro výpočet zkoseného pásku	[-]

1 ÚVOD

V dnešní době je elektrická energie nezastupitelným druhem energie. Důležitost elektrické energie se neustále zvyšuje, a proto se zvyšují také nároky na její výrobu a přenos. Kromě spolehlivosti dodávky elektrické energie je také důležitá ochrana všech elektrických zařízení, jejich případné poškození může způsobit vážné ekonomické dopady. Aby nedocházelo k poškození těchto elektrických zařízení, byly vytvořeny takové podmínky, které zajišťují jejich ochranu. Důležitou roli v této souvislosti hrají jističí přístroje. Elektrická zařízení jsou jištěna samočinnými mechanickými přístroji neboli jističi, a tím jsou tedy chráněna před nežádoucími tepelnými a silovými účinky nadproudu.

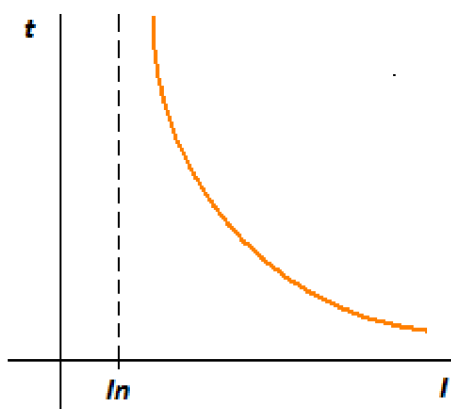
Tato práce se zabývá tepelnou nadproudovou spouští v elektrických spínacích přístrojích. První část nám popisuje princip tepelné spouště, jakožto funkční celek tepelné nadproudové spouště a možná konstrukční řešení. Základní částí tepelné spouště je bimetal. Proto se další část práce věnuje samotnému bimetalu a slouží jako podklad pro návrh bimetalového prvku v tepelné spoušti spínacího přístroje. Je zde popsán jeho princip a také materiály, které jsou nejvhodnější k výrobě bimetalu. Kromě těchto částí jsou zde dopodrobna popsány jednotlivé parametry a výpočtové vztahy, které jsou nutné k návrhu bimetalu. V závěru této práce jsou uvedeny výpočty bimetalového prvku, které jsou v praxi nejvíce používány.

Převážná část této práce se zabývá teoretickým výpočtem tepelné spouště v předem určeném jističi pro zadaný typ bimetalu a požadované vypínací charakteristiky. Výpočet je proveden na základě výpočetních vztahů, uvedených v předcházející části práce. Podstatnou částí je ověření vypracovaného výpočtu měřením. Jedná se především o měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení. V poslední části této práce je provedeno vyhodnocení výsledků získaných z teoretického výpočtu s výsledky získanými měřením. Tato práce navazuje na diplomovou práci pana Ing. Michala Zelenky.

2 TEPELNÁ SPOUŠŤ VE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJÍCH

2.1 Princip činnosti tepelné nadproudové spouště

Nadproudová spoušť je obecně hlavní součástí samočinných mechanických spínacích přístrojů (tepelné relé, jističe atd.), která snímá a vyhodnocuje velikost procházejícího proudu. Jejím účelem je dát za předem daný čas impuls k vybavení přístroje přímým působením mechanismu spouště na západku volnoběžky, dojde-li k překročení určité hodnoty proudu (nadproudu), která je dána vypínací charakteristikou každého přístroje resp. nadproudové spouště. Samotné vybavení na základě impulsu od nadproudové spouště má za úkol spínací systém. Vypínací charakteristika je časově závislá, jak je vidět na (obr. 1), čím větší nadproud, tím kratší čas vypnutí.



Obr. 1: Časově závislá vypínací charakteristika

Základním konstrukčním prvkem tepelné nadproudové spouště je bimetal, který využívá tepelných účinků proudu procházejícím přístrojem. Jeho základní funkcí je vybavit přístroj při přetížení. Prochází-li určitý nadproud dostatečně dlouhou dobu, dojde k nadměrnému ohřátí bimetalu. Důsledkem toho se bimetal prohne a prostřednictvím vybavovacího mechanismu (lišty, táhla, páky, atd.) dojde k uvolnění západky (zámku) spínacího mechanismu. Pomocí naakumulované energie v pružinách spínacího systému dojde k samočinnému rozpojení silových kontaktů. Vybavovací mechanismus poté brání návratu dvojkovu do základní (klidové) polohy. Tu může opět zaujmout až po zapnutí spínače, při kterém se lišty, táhla a páky vybavovacího mechanismu vrátí do výchozí polohy a znovu zapnutou polohu zablokují. [1] [5] [6]

2.2 Konstrukční řešení tepelných nadproudových spouští

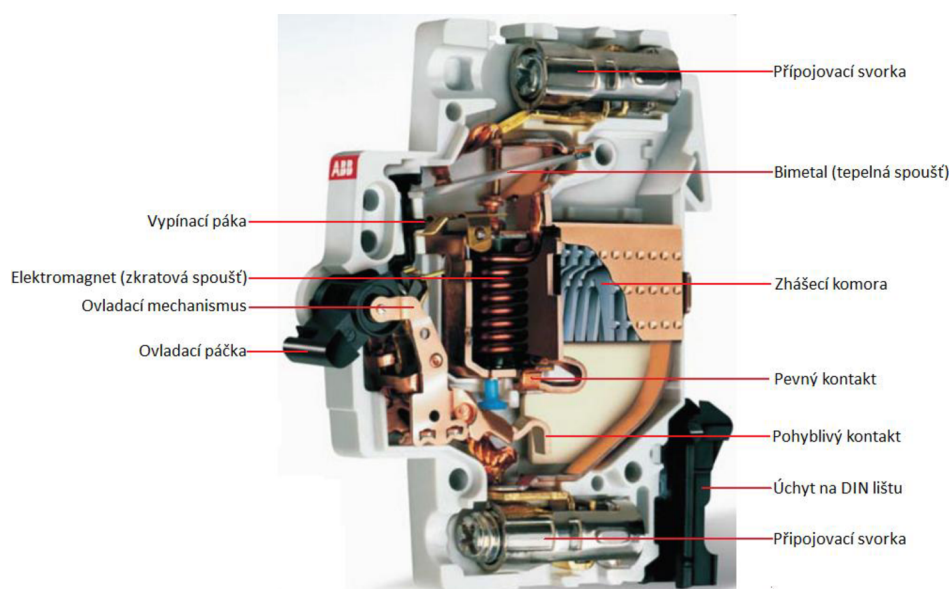
Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, je tepelná nadproudová spoušť ve spínacích přístrojích tvořena bimetalovým prvkem, který je nejčastěji tvořen přímým jednostranně upevněným páskem obdélníkového nebo zkoseného (lichoběžníkového) tvaru. Jednak může být vyhříván přímo procházejícím proudem nebo nepřímým topným páskem (topítkem), kterým je bimetal obtočen nebo je k němu přiložen. Bimetal nebo bimetal s topítkem je základním konstrukčním prvkem časově závislé spouště (jinak nazývané tepelná spoušť nebo spoušť na přetížení). Prochází-li nadproud (hodnota proudu větší než jmenovitá) dostatečně dlouhou dobu, tuto závislost vyjadřuje časově závislá část vypínací charakteristiky určitého jističe, dojde k ohřátí bimetalu a následnému prohnutí tak, že pomocí mechanické vazby (lišty, táhla, páky atd.) dojde k uvolnění západky

spínacího mechanismu. S využitím energie, která se akumuluje v pružinách spínacího systému, dojde k následnému samočinnému rozpojení silových kontaktu jističe. Síla vybavovacího mechanismu musí být malá, proto je potřeba, aby přesah stykových ploch západky byl co nejmenší.

Při výrobě je nutné tepelnou spoušť upravit a nastavit na vhodnou vybavovací polohu pracovního konce bimetalu podle aktuálních tolerancí. Předem vymezená vzdálenost mezi pracovním koncem bimetalu a vybavovacím mechanismem se nastavuje pomocí seřizovacího šroubu. V praxi je to uskutečněno tím způsobem, že jističem prochází určitý násobek jmenovitého proudu za daný čas a po té je šroub dotažen tak, aby bimetal vybavil západku spínacího mechanismu, a tím došlo k vypnutí přístroje.

Když se změní teplota okolí, dojde ke změně průhybu bimetalu a tedy i ke změně vypínací charakteristiky tepelné spouště. Aby se zamezilo změně vypínací charakteristiky při změně teploty, jsou obvykle některé přístroje vybaveny kompenzačním bimetalem, který reaguje na teplotu okolí a tím ji vyvažuje. Kompenzační bimetal je tepelně odstíněný od pracovního bimetalu a jeho vrstvy jsou převráceny.

Pro domovní instalace se nejčastěji používají malé jističe vybavené termomagnetickou nadproudovou spouští, kde jsou tepelné (časově závislé) a zkratové (časově nezávislé) spouště konstrukčně odděleny a umístěny v odlišných částech jističe. U těchto jističů je neregulovatelná tepelná spoušť, a proto stačí pouze menší síla k vybavení jejich mechanismu. Proto je zde vytvořeno přímé působení bimetalu na vybavovací mechanismus. U kompaktních jističů a spouštěčů motorů tvoří tepelné a zkratové spouště jeden celek. [1] [2] [5]



Obr. 2: Jistič s termomagnetickou spouští [7]

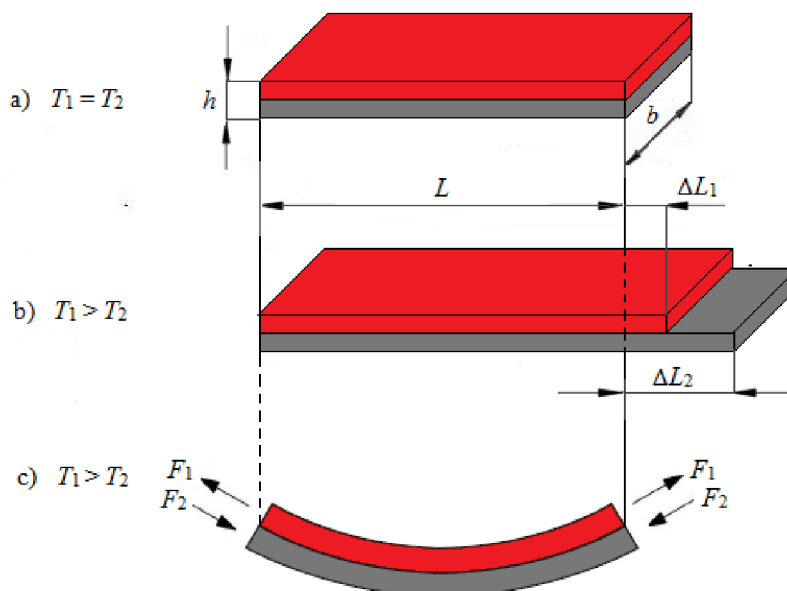
2.3 Princip činnosti bimetalu

Bimetal (dvojkov) je pásek, který je složen ze dvou vrstev kovů (obr. 3) o různé hodnotě teplotního koeficientu délkové roztažnosti $\alpha_1 < \alpha_2$. Obě vrstvy kovů jsou navzájem pevně spojeny v celém svém povrchu, který se navzájem dotýká. První vrstvu materiálu o menší hodnotě teplotního koeficientu délkové roztažnosti α_1 označujeme jako vrstvu pasivní, druhou vrstvu

materiálu o větší hodnotě teplotního koeficientu délkové roztažnosti α_2 označujeme jako vrstvu aktivní. Předpokládáme, že při teplotě okolí T_1 mají stejnou délku obě vrstvy přímého bimetalového pásku $L_1 = L_2 = L$ (obr. 3 a). Při zahřátí bimetalového pásku (v elektrických přístrojích Jouleovým teplem) na teplotu $T_2 > T_1$ (obr. 3 b) se každá ze dvou vrstev prodlouží o jinou délku ΔL .

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

Protože prodloužení pasivní vrstvy je menší než prodloužení aktivní vrstvy $\Delta L_1 < \Delta L_2$, dochází k deformaci soustavy vznikem vnitřního napětí, které je způsobeno pevným spojením obou vrstev. Při rovnoměrném oteplení vzniká v pasivní vrstvě namáhání silou F_1 (delší aktivní vrstva se jí snaží natáhnout) a v aktivní vrstvě vzniká namáhání silou F_2 (kratší pasivní vrstva brání roztažení na plnou délku $L + \Delta L_2$ odpovídající teplotě). Výsledkem je obloukový průhyb bimetalového pásku tak, že střed ohybu je na straně pasivní vrstvy s menším činitelem délkové teplotní roztažnosti α_1 . Z toho vyplývá základní vlastnost bimetalu – schopnost se zvyšující teplotou měnit tvar. Této základní vlastnosti se využívá k samočinnému ovládnutí a řízení různých teplotně závislých zařízení (např. elektromechanický termostat). V oboru elektrických spínacích přístrojů se jedná především o spouště spínačů s jisticí činností. Brání-li bimetalu v jeho přirozené deformaci nějaká překážka (západka volnoběžky jističe), tedy síla opačného významu než mají vnitřní síly (napětí) zapříčiňující deformaci, mohou tyto vnitřní síly (pokud jsou větší) činit na dráze průhybu práci, uvolnit západku volnoběžky spínacího mechanismu, a tím vyvolat vypnutí jisticího přístroje. Pokud je bimetal pevně zakotven jedním koncem, vykonává při teplotním ohybu práci jeho druhý konec. [1] [4]



Obr. 3: Princip činnosti bimetalu

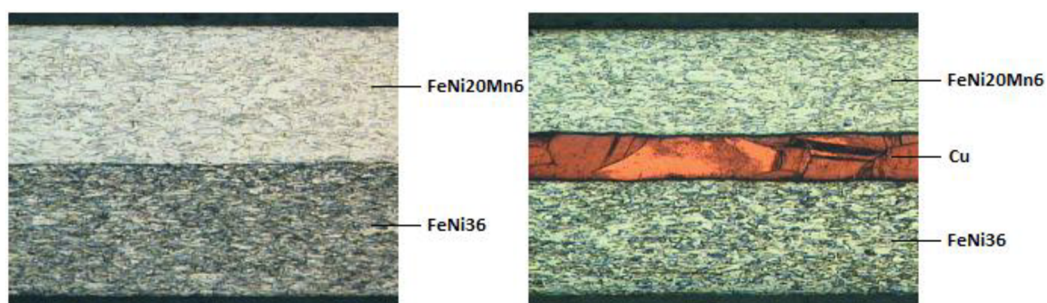
2.4 Materiály bimetalu

Materiály na zhotovení pasivní vrstvy bimetalu musí mít nízký koeficient teplotní délkové roztažnosti. Vezmeme-li v potaz tento požadavek, je nejpoužívanější materiál pasivní vrstvy slitina železo – nikl (FeNi) s obsahem niklu do přibližně 40 %. Nejznámější slitinou této soustavy

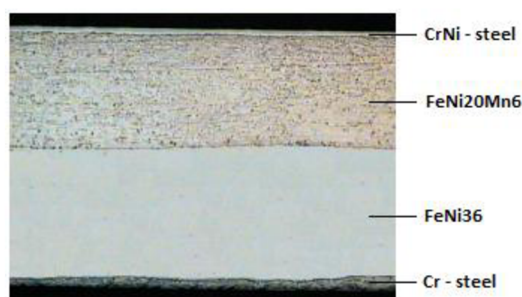
je invar, který obsahuje 36 % niklu a 64 % železa, při kterém koeficient teplotní délkové roztažnosti nepřesahuje hodnotu $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ při teplotě do 200 °C. S rostoucí teplotou se hodnota zvyšuje až na velikost $15 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ při teplotě cca 400 °C. Slitiny s obsahem niklu nad 40 % při stejných teplotách budou mít koeficient teplotní délkové roztažnosti podstatně vyšší.

Jako materiály na zhotovení aktivní vrstvy bimetalu je vhodné použít slitiny železa tak i neželezné kovy. Výjimečně lze použít i čisté železo, avšak hodnota koeficientu teplotní délkové roztažnosti je vcelku nízká 12 až $13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ při teplotách od 0 °C do 300 °C. O mnoho lepší vlastnosti mají speciální oceli obsahující nikl (např. FeNiMo, FeNiMn) nebo obsahující chrom (kanthal – FeCrAl). Ze skupiny neželezných kovů je to hlavně nikl, slitiny mědi, jako například mosaz (CuZn), konstantan (CuNiMn), monel (NiCu), hliníkový a beryliový bronz. Tyto materiály jsou charakteristické vysokými hodnotami koeficientu tepelné délkové roztažnosti, vyhovujícími mechanickými vlastnostmi a menším měrným elektrickým odporem než u slitin železa.

Hodnota koeficientu tepelné délkové roztažnosti kovů je závislá na teplotě. Citlivost bimetalu tedy závisí na pracovní teplotě, a proto v praxi jeho použití přichází v úvahu pouze v určitém rozsahu pracovních teplot. Podle volby materiálu aktivní a pasivní vrstvy existují bimetaly o různé citlivosti a vhodnosti pro různý rozsah pracovní teploty. Bimetaly pro pracovní teploty do 200°C mají odlišné složení než bimetaly pro pracovní teploty do 350 °C (respektive do 400 °C). Bimetaly se nedají použít při vyšších teplotách, z důvodu jejich nepřijatelného poklesu mechanické pevnosti. Výrobci často udávají u jednotlivých typů bimetalu rozsah teplot linearity jejich charakteristik, což je rozsah teplot stejnoměrné citlivosti bimetalu. [1] [4]



Obr. 4: Struktura bimetalu 2vrstvy a 3vrstvy. [2]



Obr. 5: Struktura bimetalu 4 vrstvy. [2]

2.5 Parametry bimetalu

Parametry, které musí tepelná spoušť (bimetal) splňovat jako základní konstrukční prvek spouště, závisí na geometrických a fyzikálních parametrech s danými tolerancemi a konstantními vlastnostmi. Výroba bimetalu má hlavní vliv na dodržení parametrů. [1] [2] [3]

2.5.1 Měrná tepelná křivost

Podle [1] [2] [3] jde o nejpodstatnější parametr bimetalu. Měrná tepelná křivost je charakteristická vlastnost materiálu, kterou v praxi nejpřesněji určíme experimentálně nebo pomocí výpočtu z hlediska dimenzování a optimalizace bimetalu. Pro bimetal, který se skládá ze dvou vrstev, lze měrnou tepelnou křivost vypočítat podle následujícího vztahu:

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

k	je	měrná tepelná křivost bimetalu [K ⁻¹];
α ₁		koeficient teplotní délkové roztažnosti (aktivní vrstva) [K ⁻¹];
s ₁		tloušťka aktivní vrstvy [mm];
E ₁		modul pružnosti v tahu aktivní vrstvy [MPa];
α ₂		koeficient teplotní délkové roztažnosti (pasivní vrstva) [K ⁻¹];
s ₂		tloušťka pasivní vrstvy [mm];
E ₂		modul pružnosti v tahu pasivní vrstvy [MPa].

Měrná tepelná křivost je závislá na koeficientech tepelné délkové roztažnosti, modulu pružnosti v tahu a tloušťce obou vrstev (aktivní, pasivní) bimetalu. Za předpokladu, že rozdíl koeficientů teplotní délkové roztažnosti (α₁ - α₂) je konstantní, bude měrná tepelná křivost nabývat maximální hodnoty při poměru tloušťky aktivní a pasivní vrstvy:

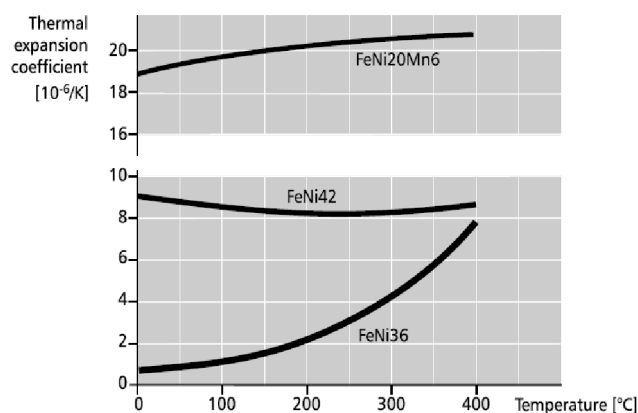
$$\frac{s_1}{s_2} = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \quad [-] \quad (3)$$

Jestliže se měrná tepelná křivost blíží k maximální hodnotě z hlediska poměru tloušťky a modulu pružnosti tahu obou vrstev podle vztahu (3), je možné vztah (4) zjednodušit na tvar:

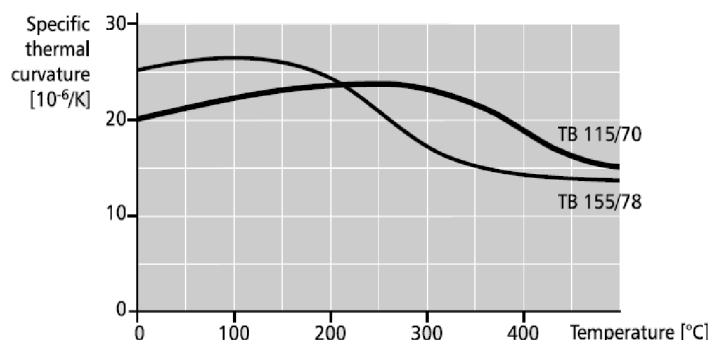
$$k = \frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2) \quad [\text{K}^{-1}] \quad (4)$$

Měrná tepelná křivost je pak úměrná jen rozdílu koeficientů teplotní délkové roztažnosti. Jelikož velikost koeficientů teplotní délkové roztažnosti závisí na materiálu a teplotě obou vrstev (obr. 6 a obr. 7), je možné navrhnout vhodnými kombinacemi funkční vlastnosti bimetalu. Měrná teplotní křivost se měří v rozmezí teplot od 20 °C do 130 °C. Při tomto rozmezí je pro většinu bimetalu měrná tepelná křivost v závislosti na teplotě v celém svém průběhu téměř konstantní.

Pro výpočet průhybu, který je v pracovní oblasti (rozmezí teplot) nebo částečně až zcela mimo rozsah linearitu, je možné podle tabulky [2] určit rozdílnou měrnou tepelnou křivost.



Obr. 6: Příklad teplotní závislosti délkové roztažnosti pro koeficienty FeNi36, FeNi42 a FeNi20Mn6 [2]



Obr. 7: Příklad teplotní závislosti měrné tepelné křivosti pro koeficienty TB 155/78 (FeNi36/FeNi20Mn6) a TB 115/70 (FeNi42/FeNi20Mn6) [2]

Pokud je bimetal při počáteční teplotě T_1 rovný a při teplotě T_2 dojde k určité deformaci bimetalu, tak můžeme měrnou tepelnou křivost určit ze vztahu:

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

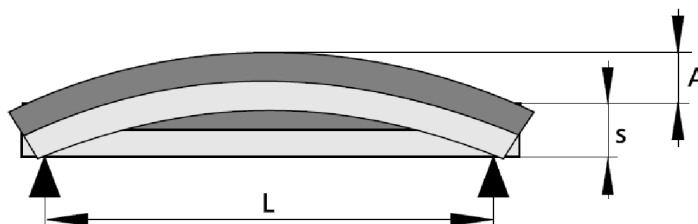
kde A je vzdálenost měřících bodů při teplotě T_1 a T_2 [K^{-1}];

s průměrná tloušťka bimetalu [mm];

L aktivní délka bimetalu [mm];

T_1, T_2 počáteční a koncová teplota bimetalu [$^{\circ}\text{C}$].

Hodnota měrné tepelné křivosti se nejčastěji udává v [10^{-6}K^{-1}], [$10^{-6}/\text{K}$] nebo $1/\text{MK}$. [1] [2] [3]



Obr. 8: Zakřivení prostě podepřeného bimetalového pásku [2]

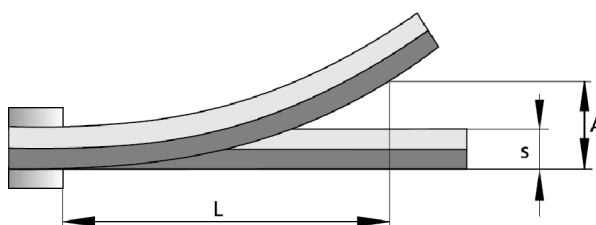
2.5.2 Měrný tepelný průhyb

Je charakteristická vlastnost materiálu obdobně konkrétní k měrné tepelné křivosti. Měrný tepelný průhyb byl dříve udáván na základě výrobců jako katalogová hodnota. Určoval se experimentálně, kdy se měřila výchylka bimetalového pásku, který byl na jednom konci upevněn. Vzhledem k vyvarování se chybám a nejistotám měření vlivem mechanického napětí, které vznikalo v místě spojení, byl výrobcem měrný tepelný průhyb nahrazen v katalogových listech měrnou tepelnou křivostí. Avšak při výpočtu bimetalu se stále tento parametr často používá. Protože je měrný tepelný průhyb 0,52 až 0,54 násobkem tepelné křivosti, je možné za pomoci přepočítávacího vztahu (6) předpokládat výpočet bimetalu za docela přesný. [1] [2] [3]

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

kde a je měrný tepelný průhyb bimetalu $[\text{K}^{-1}]$;

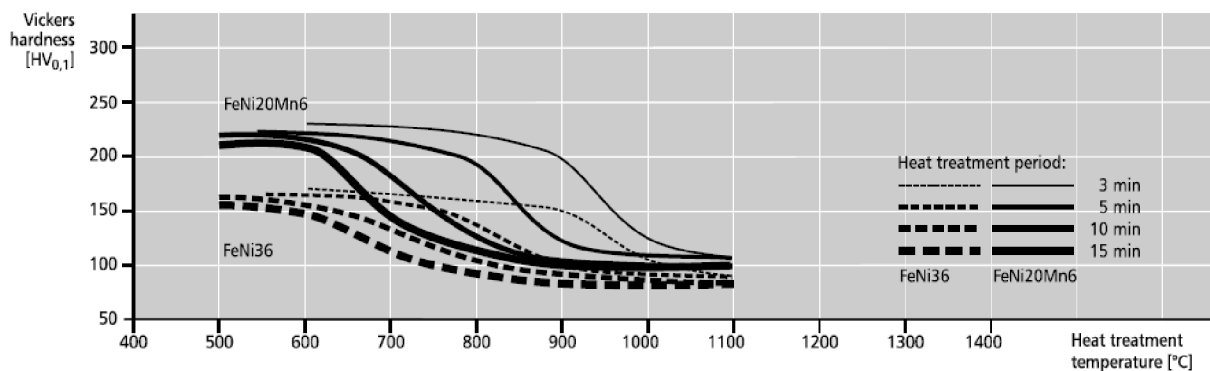
k měrná tepelná křivost bimetalu $[\text{K}^{-1}]$.



Obr. 9: Průhyb na jednom konci upevněného bimetalu [2]

2.5.3 Maximální provozní teplota

Na základě [1] [2] [3] jsou bimetalu schopny pracovat v rozmezí teplot přibližujících se absolutní nule až do několik seti stupňů Celsia, pokud je v celém rozmezí pracovních teplot zaručena dostatečná teplotní citlivost, nesmí docházet ke změně struktury a k výrazné změně povrchu vlivem oxidace. Maximální provozní teplota v podstatě závisí na charakteristických vlastnostech rekrystalizačních vrstev. Při rekrystalizaci dochází k trvalým změnám materiálových vlastností bimetalu. Teplotu rekrystalizace lze stanovit různými metodami, například měřením tvrdosti podle Vickerse po jeho tepelném zpracování za různých podmínek. Rekrystalizace nastává tehdy, kdy dochází k poklesu křivek tvrdosti (obr. 10).



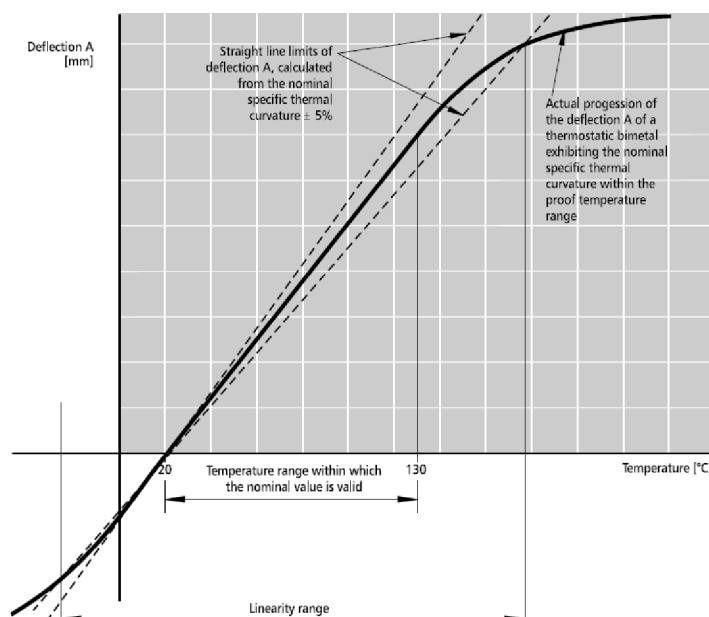
Obr. 10: Tvrdost podle Vickerse jako funkce teploty a doby trvání [2]

Toto změkčení materiálu v první řadě omezuje velikost síly, kterou je bimetal schopen vyvinout. Pokud se požaduje malé nebo žádné silové působení bimetalu v konkrétní aplikaci, je možné bimetal použít při teplotách větších než je teplota rekrystalizace za předpokladu, že bimetal stále postačuje teplotní citlivosti a nedochází k trvalé deformaci při průhybu a zakřivení. Pro maximální provozní teplotu bimetalu musíme brát v úvahu vlastnosti aktivní, pasivní vrstvy, ale i materiálu všech přidaných vrstev. Bimetaly s přídavnou vrstvou mědi mají v důsledku relativně nízkou maximální provozní teplotu. Pokud u bimetalů dochází při nízkých teplotách k trvalé deformaci a nevratné změně struktury jednotlivých vrstev, mají bimetaly definovanou minimální provozní teplotu. Bimetaly je možné používat při teplotách až do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale pokud vykazují dostatečně vysokou teplotní citlivost lze je použít při teplotách až do mínus $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1] [2] [3]

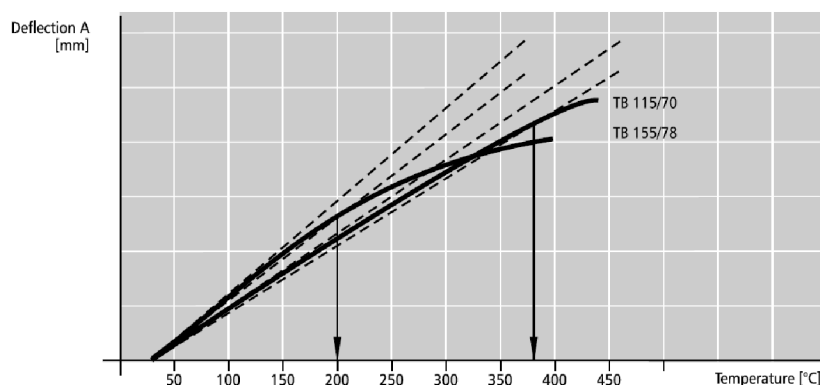
2.5.4 Rozmezí linearity

V rámci svých provozních možností, má každý bimetal definován teplotní rozsah, ve kterém je teplotní citlivost relativně konstantní. Teplotní rozsah se řídí koeficienty teplotní délkové roztažnosti a jejich kombinací v rámci jednotlivých vrstev bimetalu. Jako příklad lze uvést teplotní roztažnost slitiny FeNi36, která je v rozmezí teplot od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ velmi nízká, avšak při teplotách větší než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ se prudce zvyšuje. Pokud je bimetal (pasivní vrstva) vyroben z této slitiny, bude hodnota měrné tepelné křivosti vysoká při teplotách nižších než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avšak hodnota tepelné citlivosti bude klesat při teplotách větších než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě, že bimetal má při vysokých teplotách poměrně konstantní teplotní citlivost, musí být bimetal (aktivní vrstva) vyroben z jiného materiálu s vysokou hodnotou tepelné roztažnosti, přitom však dojde ke snížení teplotní citlivosti.

Podle normy DIN 1715 je rozmezí linearity (obr. 11) definováno jako teplotní rozsah, ve kterém se teplotní průhyb neliší o více než $\pm 5\%$ od vypočtené hodnoty pomocí jmenovité měrné tepelné křivosti a jmenovité tloušťky daného bimetalu. Rozmezí linearity je proto rozsahem teplot, ve kterém lze nejlépe použít průhybu bimetalu. [1] [2] [3]



Obr. 11: Rozmezí linearity [2]



Obr. 12: Maximální provozní teplota v rozmezí linearity pro různé druhy bimetalu [2]

2.5.5 Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu je důležitý parametr pro výpočet a návrh bimetalu. Pro dvouvrstvé bimetal je výpočet poměrně jednoduchý. Nevyžaduje-li se velká přesnost výpočtu a rozdíl mezi jednotlivými vrstvami, tedy pokud jsou tloušťky a modul pružnosti přibližně stejné ($s_1 \cong s_2$; $E_1 \cong E_2$), lze modul pružnosti určit podle vztahu:

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

V případě, že výše uvedené podmínky neplatí a bimetal nemá maximální teplotní citlivost pro modul pružnosti, platí vztah:

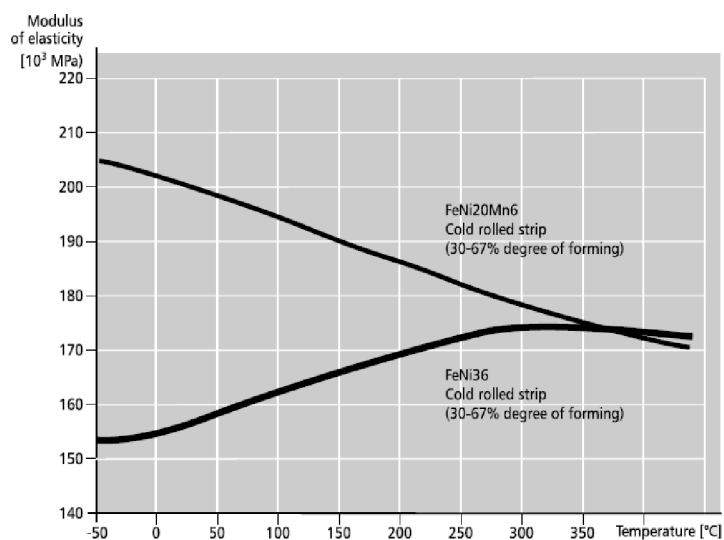
$$E = E_1 \frac{(1 - m^2 n)^2 + 4mn(1 + m)^2}{n(1 + mn)(1 + m)^3} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

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

Pro bimetal s maximální teplotní citlivostí lze vztah (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 závislý na teplotě. Pokud použijeme MnNiCu v kombinaci s FeNi při výrobě bimetalu, je modul pružnosti prakticky nezávislý na teplotě. Naopak použijeme-li kombinace FeNiMn (nebo FeNiCr) s FeNi, dojde při maximální provozní teplotě k poklesu modulu pružnosti přibližně o 10%. Příčinou této mírné teplotní závislosti je, že modul pružnosti pasivní vrstvy se zvyšující teplotou roste a modul pružnosti aktivní vrstvy klesá (obr. 13). Při návrhu a výpočtu bimetalu zahrnující tolerance vzhledem k zjednodušení a předpokladům, bude modul pružnosti stačit při pokojové teplotě přibližně 20 °C. [1] [2] [3]



Obr. 13: Teplotní závislost modulu pružnosti pro slitiny FeNi20Mn6 a FeNi36 [2]

2.5.6 Měrný elektrický odpor

Podle [1] [2] [3] je princip činnosti bimetalu založen na působení tepla. Toto teplo může být generováno přímo v bimetalu při průchodu proudu přes něj, nebo teplo může do bimetalu přestoupit vedením, prouděním nebo zářením. V praxi se obvykle používá podobná konstrukce přístrojů s různými hodnotami vypínacího proudu. Z toho plyne, že tvar bimetalu by měl mít přibližně stejný tvar a přibližně stejný průhyb. Daný průhyb bimetalu lze pomocí stejných rozměrů, různých hodnot vypínacího proudu (při přímém elektrickém 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	průhyb bimetalu [mm];
	k		měrná tepelná křivost bimetalu [K^{-1}];
	ρ		měrný elektrický odpor bimetalu [$\mu\Omega \cdot \text{m}$];
	L		délka bimetalu [mm];
	I		efektivní hodnota elektrického proudu [A];
	t		doba ohřevu bimetalu [s];
	s		tloušťka bimetalu [mm];
	b		šířka bimetalu [mm];
	γ		hustota bimetalu [$\text{g} \cdot \text{cm}^3$];
	c		měrná tepelná kapacita bimetalu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Měrný elektrický odpor lze upravit změnou poměru tloušťek aktivní a pasivní vrstvy, nebo také přidáním mezivrstvy (měď, nikl) a krycí vrstvy s různou tloušťkou sloužící k ochraně proti korozi. Výpočet měrného elektrického odporu pro třívrstvý bimetal je podobný výpočtu elektrického odporu tří rezistorů zapojených paralelně tj:

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

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

Měrný elektrický odpor bimetalu je důležitým parametrem a určuje se měřením elektrického odporu definovaného bimetalového pásku při teplotě 20 °C. Měrný elektrický odpor se potom vypočítá podle vztahu:

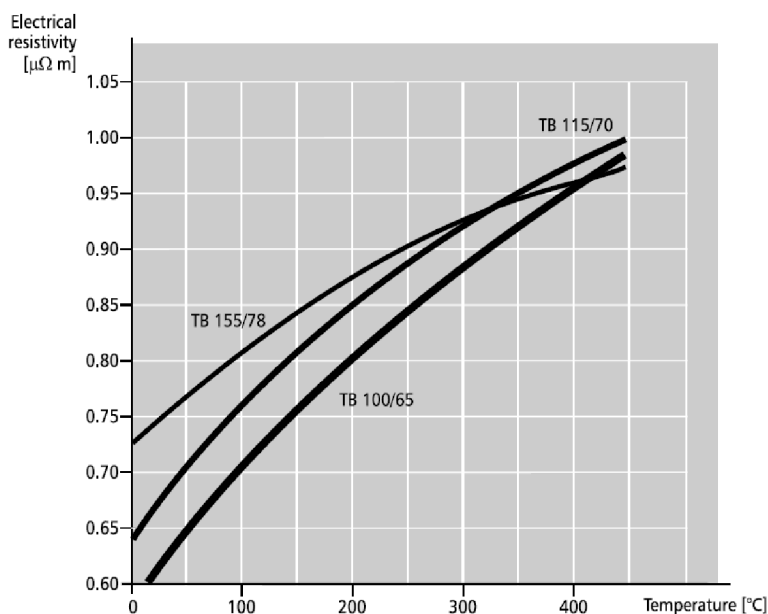
$$\rho = \frac{Rsb}{L} \quad [\mu\Omega.m] \quad (12)$$

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

Měrný elektrický odpor je závislý na teplotě, tj. s rostoucí teplotou roste i hodnota elektrického odporu. Pro zjednodušení výpočtu se předpokládá, že charakteristika elektrického odporu se mění lineárně s teplotou podle vztahu:

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

- kde ρ_1 je měrný elektrický odpor bimetalu při teplotě T_1 [$\mu\Omega.m$];
 ρ_2 měrný elektrický odpor bimetalu při teplotě T_2 [$\mu\Omega.m$];
 ε teplotní koeficient elektrického odporu [K^{-1}];
 T_1 počáteční teplota bimetalu [$^{\circ}C$];
 T_2 koncová teplota bimetalu [$^{\circ}C$]. [1] [2] [3]



Obr. 14: Teplotní závislost měrného elektrického odporu pro různé typy bimetalu [2]

2.5.7 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je charakteristická vlastnost materiálu, která je důležitá pro výpočet přímého a nepřímého ohřevu bimetalu. Měrná tepelná kapacita je závislá na teplotě, pro většinu bimetalu se její hodnota pohybuje v rozmezí $0,39$ až $0,46 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ při pokojové teplotě. Za normálních okolností se pro termodynamické výpočty používá střední měrná tepelná kapacita c_m , i když při pokojové teplotě může být použita pro výpočet elektricky vytápěných bimetalů. Důvodem je, že teplotní závislost měrné tepelné kapacity bimetalu se zvyšuje lineárně jen o cca 10 % až do teploty 400 °C a že tepelné procesy mohou být pouze odhadovány kvůli předpokladům týkajících se výměny tepla. [1] [2] [3]

2.5.8 Tepelná vodivost

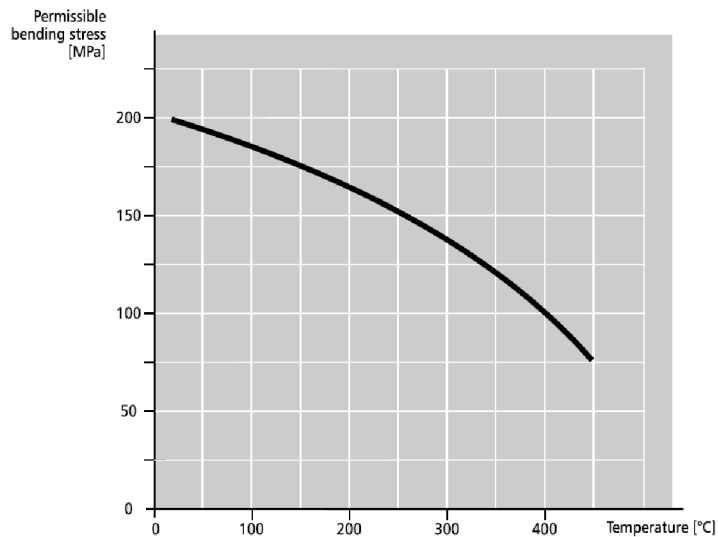
Tepelná vodivost je charakteristická vlastnost materiálu. Určuje rychlost, kterou je rovnoměrně rozložení teploty dosaženo v celém bimetalu po změně teploty a bez ohledu na druh ohřevu (přímý, nepřímý). Číselná hodnota tepelné vodivosti se nepoužívá přímo pro výpočet bimetalu, ale slouží k odhadu druhu bimetalu pro konkrétní aplikace. Bimetal s přídatnou vrstvou mědi je dobrým vodičem tepla, protože měď má mnohem větší tepelnou vodivost než slitiny FeNi. Proto se používá v aplikacích s vysokou teplotní reakcí, aby se zabránilo vzniku velkých teplotních špiček. [1] [2] [3]

2.5.9 Tepelné záření

Nepřímý přenos tepla lze chápat jako výměnu záření mezi dvěma povrchy. Množství přeneseného tepla při teplotní výměně závisí mimo jiné i na koeficientech záření povrchů. Čím větší jsou koeficienty tepelného záření, tím lepší přenos tepla. Koeficient tepelného záření dosahuje hodnot maximálně $5,77 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ pro černé těleso, pro lesklé kovy přibližně $1,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ a pro tmavé a matné zoxidované kovy $5,65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$. Pro ohřev bimetalu zářením je v určitých případech užitečné natřít bimetal načerno pro zvýšení koeficientu tepelného záření, a tím dosáhnout efektivní přenos tepla. [1] [2] [3]

2.5.10 Dovolené napětí v ohybu

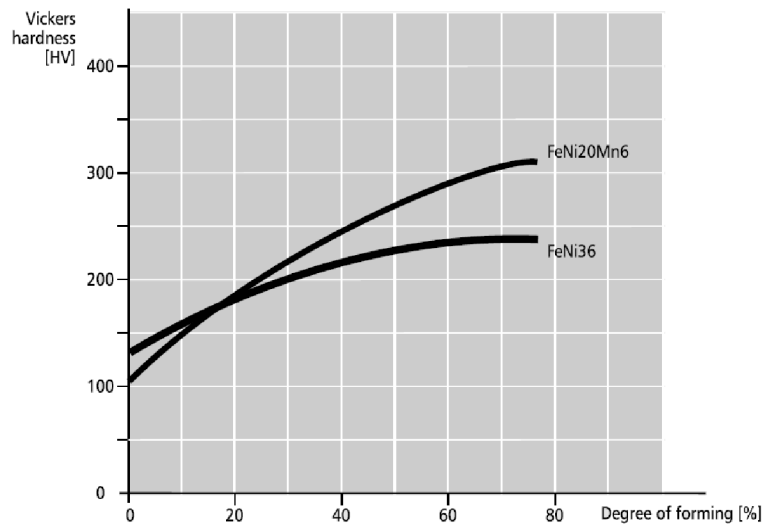
Dovolené napětí v ohybu je důležitým parametrem, jeho hodnota je potřebná pro výpočet síly vyvíjené bimetalem, například pro přímé účinkování spínacího mechanismu. Dosažitelnost síly je omezena ohybovým napětím, při kterém ještě nedochází k plastické deformaci bimetalu. Při překročení dovoleného namáhání dochází k trvalé deformaci, která zhoršuje funkčnost bimetalu. V praxi lze uvažovat při návrhu bimetalu napětí na mezi pružnosti, tedy napětí, při kterém dochází k trvalému prodloužení nebo zkrácení bimetalu o 0,005 % z naměřené délky. Při návrhu bimetalu je potřeba brát v úvahu, že hodnota dovoleného napětí je jako většina parametrů závislá na teplotě. Katalogová hodnota dovoleného napětí poskytnuta výrobcem se uvádí s dostatečně širokou bezpečnostní rezervou. Přesnou hodnotu dovoleného napětí lze určit pouze experimentálně. [1] [2] [3]



Obr. 15: Příklad závislosti dovoleného ohybového napětí na teplotě [2]

2.5.11 Tvrdość podle Vickerse

Za účelem dosažení dostatečné pružnosti pro konkrétní použití, jsou bimetalny obvykle tvářeny za studena s 20 až 50 % stupně. Vyššího stupně tváření za studena může být požadováno pro určité hodnoty pružnosti bimetalu. Je však třeba mít na paměti, že obvyklý stupeň tváření za studena 20 až 50 % by měl být upraven na požadované vlastnosti pružnosti a pro příkladné tvarovací procesy. To znamená, že pro materiály s méně než 20 % tvářením za studena, jsou vyžadovány složité výrobní procesy. Na základě poznatků a různých pevnostních charakteristik aktivní a pasivní vrstvy a podle již předešlých zkušeností, inženýři preferují používání tvrdosti podle Vickerse jako kritérium pro správný výběr vhodného procesu tvarování a ohýbání. Pokud jsou použity vysoké stupně tváření, je třeba připomenout, že maximální použitá teplota bimetalu bude nižší. [1] [2] [3]



Obr. 16: Tvrdost podle Vickerse pro různé slitiny v závislosti na stupni tváření [2]

2.5.12 Odolnost proti korozi

Název koroze popisuje škodlivé změny materiálu vznikající na povrchu, kde dále pokračuje do struktury jednotlivých vrstev bimetalu. Koroze je způsobena chemickou nebo elektrochemickou reakcí materiálu s okolním prostředím. Důvod proč kovy korodují a fakt, že typ koroze se liší u každého druhu kovu, je vysvětlen jejich výskytem v přírodě. Většina kovů, zvláště ty základní, se nevyskytují v přírodě v čisté formě, ale ve sloučeninách. Energie je vyžadována pro získání čistých kovů nebo kovových slitin. Pokud jde o energii – kov se snaží vrátit do původního stavu. Koroze má dvojí účinek. První účinek je, že se materiál ztrácí skrze degradaci kovu. Druhý účinek není tak škodlivý, vzniká především prostřednictvím povrchových změn a změny i vlastností. Může způsobit mechanické poškození vlastností bimetalu (prasknutí, zlomení). Proto musí být bimetal dostatečně odolné proti korozi, a to při nejrůznějších atmosférických podmínkách. [1] [2] [3]

Existují tři různé způsoby jak zabránit nebo případně snížit výskyt koroze:

- přidání ochranné vrstvy na povrch aktivní vrstvy (MnNiCu, FeNiMn) a pasivní vrstvy (FeNi)
- galvanické pokovování aktivní a pasivní vrstvy pomocí niklu, mědi, kadmia, zinku, stříbra a zejména cínu
- použití korozivzdorných ocelí při výrobě aktivní a pasivní vrstvy bimetalu.



Obr. 17: Ukázka praskliny způsobená korozi účinkem mořského vzduchu.[2]

2.6 Výpočet bimetalu

Při výpočtu bimetalového prvku, by měly být zváženy následující faktory:

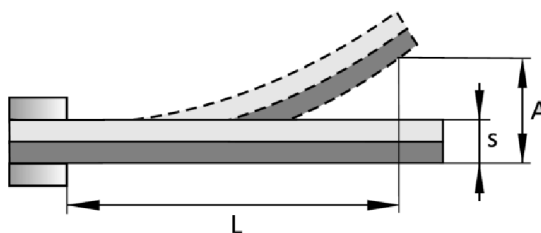
- požadovaný průhyb
- působení vnějších sil
- dovolené ohybové napětí
- optimální objem bimetalu
- způsob výroby
- velikost prostoru pro uložení a práci

Přesný výpočet bimetalového mechanismu je složitý, protože výpočet vnitřního napětí a z něj vyplývající deformace lze provést jen přibližně. Ani časový průběh oteplování a rozložení teplot také nelze dobře zachytit a tedy i tyto veličiny přesně neznáme. Chceme-li vypracovat teoretické odvození vztahů mezi oteplením, působícími silami a průhybem, je potřeba poměry idealizovat. Potom je však nutné ověřit teoretické vzorce experimentálně a přijatelným způsobem korigovat. I tak jsou výpočty jednoduchých mechanismů poměrně složité a v mnoha případech nelze analytickým výpočtem dosáhnout velkého stupně přesnosti. Výsledky výpočtu se mohou lišit od skutečných výsledků, a proto musíme výsledky ověřovat měřeními. Většinou se ve spínacích přístrojích setkáváme s přímým jednostranně upevněným páskem obdélníkového nebo zkoseného (lichoběžníkového) tvaru stejné šířky, a proto jsou zde uvedeny jednotlivé výpočty pro tyto typy bimetalu.

Idealizací pro výpočet bimetalu ve tvaru štíhlého pásku jsou následující předpoklady:

- Při teplotě okolí T_1 je bimetalový pásek z homogenních materiálů přímý a je rovnoměrně ohříván proudem.
- Při teplotě T získává bimetalový pásek tvar kruhového oblouku se středním poloměrem ρ .
- Průhyb bimetalu je vyvolán silami F_1 a F_2 , které pásek natahují a stlačují, u těchto sil předpokládáme působení v těžišti průřezu pásku.
- Obdélníkový průřez bimetalového pásku se mění, tzn., že kulové zakřivení, které se ve skutečnosti vytváří, můžeme vzhledem ke štíhlosti zanedbat. [1] [2] [3] [4]

2.6.1 Jednostranně upevněný přímý bimetal obdélníkového tvaru



Obr. 18: Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu obdélníkového tvaru.[2]

Volný průhyb bimetalu při změně teploty:

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

Síla vyvíjená bimetalem při částečném průhybu:

$$F_u = \frac{s^3 b E A_u}{4L^3} \quad [\text{N}] \quad (15)$$

Síla vyvíjená bimetalem při maximálním průhybu při změně teploty:

$$F_o = \frac{0,53s^3 b E (T_2 - T_1)}{4L} \quad [\text{N}] \quad (16)$$

Maximální dovolená síla vyvíjená bimetalem při maximálním ohybovém napětí:

$$F_{max} = \frac{\sigma_{max} b s^2}{6L} \quad [\text{N}] \quad (17)$$

Teplota:

$$T_2 - T_1 = \Delta T = T_A - T_F \quad [\text{K}] \quad (18)$$

Při využití volného průhybu a hnací síly musí být využitelná teplotní změna rozdělena:

$$T_A = \frac{As}{0,53kL^2} \quad [\text{K}] \quad (19)$$

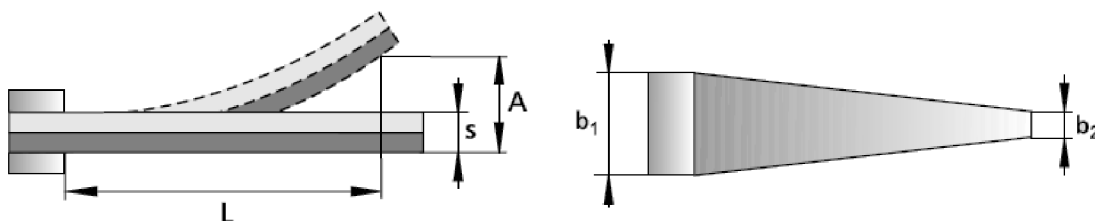
$$T_F = \frac{4FL}{0,53kbs^2E} \quad [\text{N}] \quad (20)$$

Teoreticky lze dosáhnout maximální pracovní kapacity při minimálním objemu bimetalu tím, že bude předpokládáno rozdělení teplotního diferenciálu pro cílený průhyb i pro sílu:

$$V_{min} = \frac{16FA}{0,53kbs^2E} \quad [\text{mm}^3] \quad (21)$$

Rozdělením teploty přesně mezi průhyb a sílu dosáhneme minimálního objemu bimetalu. V praxi může být ale zapotřebí vybrat jiné teplotní rozdělení z důvodu návrhu konstrukce. [1] [2] [3]

2.6.2 Jednostranně upevněný přímý bimetal zkoseného tvaru



Obr. 19: Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu zkoseného tvaru [2]

Počátečním bodem výpočtu pro přímý zkosený bimetal je obdélníkový tvar. Vyvíjená síla je úměrná k šířce materiálu. Pokud je poměr šířky $b_2/b_1 < 1$, je možné dosáhnout menšího objemu bimetalu na konstantě $P/\Delta T$, nežli dovoluje obdélníkový tvar.

Pro koeficient Ψ je zaveden tento výpočet:

$$\Psi = \frac{2(1-n)^3}{n^2 \left[3 + 4,605 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \right) \right] - 4n + 1} \quad [-] \quad (22)$$

$$n = \frac{b_2}{b_1} \quad [-] \quad (23)$$

kde $\psi = 3, b = b_1 = b_2$

Vybráním $b_2 = 0$ pro $\psi = 2$ je možné ušetřit 25% na materiálu, přičemž pracovní kapacita zůstane stejná.

Volný průhyb bimetalu při změně teploty:

$$A_V = \frac{\alpha k \Delta T L^2}{s} = \frac{0,53 k (T_2 - T_1) L^2}{s} \quad [\text{mm}] \quad (24)$$

Maximální dovolená síla vyvíjená bimetalem při maximálním ohybovém napětí:

$$F_{max} = \frac{\sigma_{max} b_1 s^2}{6L} \quad [\text{N}] \quad (25)$$

Síla vyvíjena bimetalem při částečném průhybu:

$$F_u = \frac{E b_1 \Psi s^3 A_u}{12L^3} \quad [\text{N}] \quad (26)$$

Síla vyvíjená bimetalem při maximálním průhybu při změně teploty:

$$F_o = \frac{0,53kEs^2b_1\Psi(T_2 - T_1)}{12L} \quad [\text{N}] \quad (27)$$

Teplota:

$$T_2 - T_1 = \Delta T = T_A - T_F \quad [\text{K}] \quad (28)$$

kde $T_p = 0,5 \Delta T$

Minimální objem bimetalu pro vykonání požadované práce:

$$V_{min} = \frac{F}{T_p} = \frac{0,53kEbs^2}{4L} = \frac{0,53kEb_1\Psi s^2}{12L} \quad [\text{mm}^3] \quad (29)$$

$$\frac{b}{4} = \frac{b_1\Psi}{12} \quad [\text{mm}] \quad (30)$$

kde $\psi = 2, b_1 = 1,5b$

Objem:

$$V = 0,5(b_1 + b_2)Ls = 0,5 * 1,5bLs = 0,75bLA \quad [\text{mm}^3] \quad (31)$$

Ze vztahu (31) jde vidět, že je zapotřebí pouze 75 % objemu obdélníkového bimetalu. Tento tvar se doporučuje vždy, kde by došlo k překročení dovoleného ohybového napětí při použití obdélníkového tvaru. Zkosený tvar umožňuje odpovídající dimenzování šířky v místě vetknutí. [1] [2] [3]

2.7 Vypínací charakteristika tepelné nadproudové spouště

Vypínací charakteristika jističe, v některých případech také nazývána jako charakteristika času a proudu, je celková závislost vypínací doby jističe v závislosti na proudu procházejícím jističem. Vypínací charakteristiky jističů jsou obecně ohraničeny mezemi, které udávají předmětové normy ČSN. Případné další meze vypínací charakteristiky jsou eventuálně stanoveny podle účelu použití jističů. Pro praktické použití jsou nejdůležitější meze ohraničující první bod vypínací charakteristiky:

- smluvený nevypínací proud I_{nt} , tento proud nesmí jistič vypnout do smluvené doby,
- smluvený vypínací proud I_t , tento proud musí jistič vypnout do smluvené doby.

Pro domovní instalace a podobné jsou meze vypínací charakteristiky jističů dány předmětovou normou ČSN EN 60898-1.

Jističe nebo také nadproudové relé pro obecné použití mají obvykle možnost proudového nastavení tepelné spouště ve vymezeném proudovém rozsahu. V tomto případě je jmenovitý

proud I_n tepelné spouště jističe roven nejvyšší hodnotě proudového nastavení. Menší hodnota určitého proudového nastavení jističe se nazývá redukovaný proud I_r , který je dán vztahem:

$$I_r = k \cdot I_n \quad [A] \quad (32)$$

kde I_r je redukovaný proud jističe [A];
 k násobek proudového nastavení [-];
 I_n jmenovitý proud jističe [A].

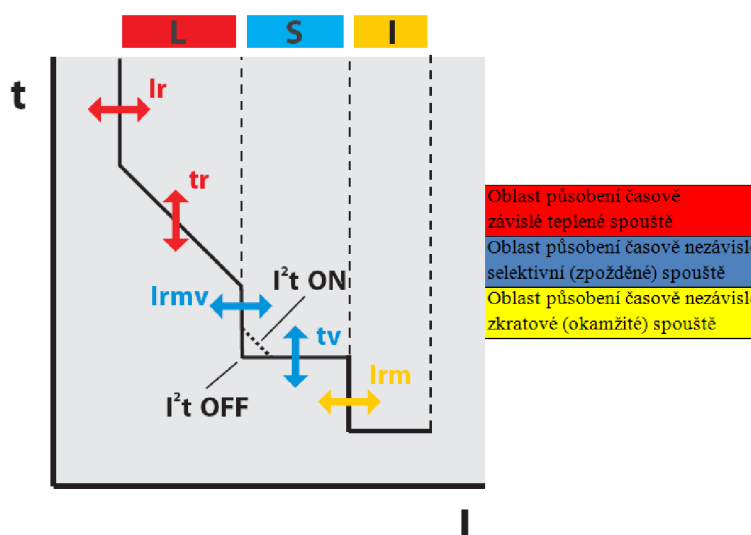
Redukovaný proud může být udáván násobkem jmenovitého proudu tepelné spouště jističe nebo rovnou jako hodnota proudu.

Podle normy ČSN EN 60947-2 pro obecné použití, jsou dány meze vypínacích charakteristik jističů a jsou stanoveny pouze pro jejich první bod. Vypínací charakteristiky u těchto jističů mohou mít až 3 oblasti působení (obr. 20).

Tab. 1: Meze vypínacích charakteristik podle normy ČSN EN 60947-2 [5]

Jmenovitý proud jističe I_n	Smluvená doba	Smluvený nevypínací proud I_{nt}	Smluvený vypínací proud I_t
[A]	[h]	1,05 násobek proudového nastavení	1,3 násobek proudového nastavení
$I_n \leq 63$ A	1		
$I_n > 63$ A	2		

Ostatní část vypínací charakteristiky je uváděna výrobcem přístroje podle přizpůsobení průběhu vypínací charakteristiky chráněného zařízení. [5]



Obr. 20: Obecná charakteristika jističů podle normy ČSN EN 60947-2 [5]

3 VÝPOČET BIMETALU VE SPÍNACÍM PŘÍSTROJI NN

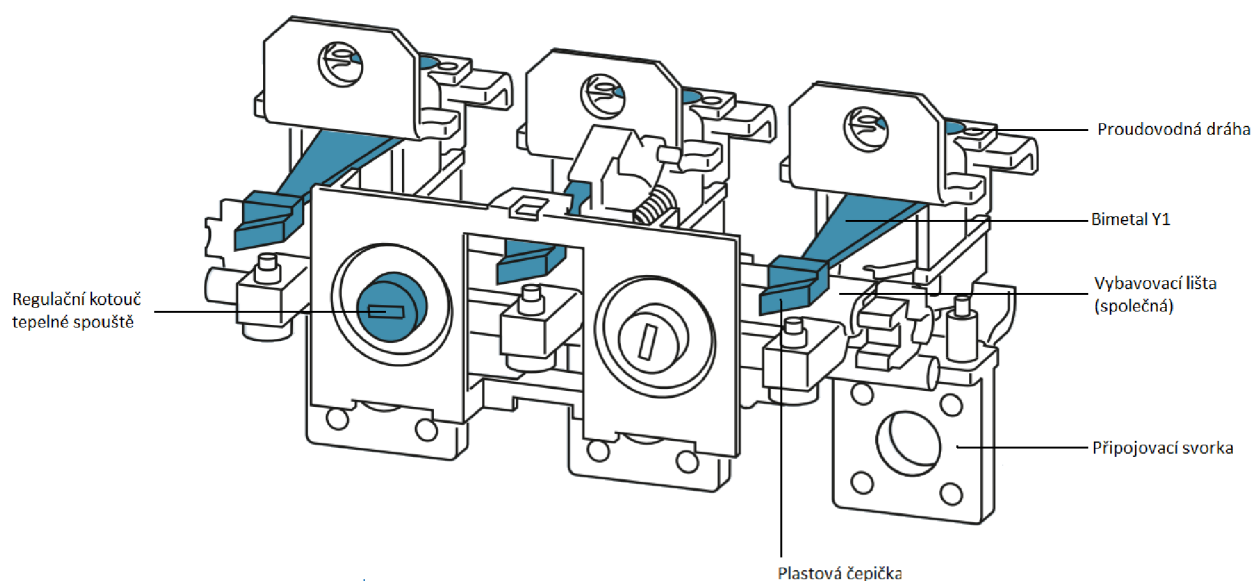
Výpočet je realizován pro bimetal v kompaktní jističi X1 s termomagnetickou nadproudovou spouští. Označení X1 je z důvodu, že použitý jistič je vývojový vzorek určený ke zkušebním a laboratorním účelům. Hlavním úkolem výpočtu je teoretické určení volného průhybu bimetalového pásku v závislosti na oteplení. Výpočet je uskutečněn pomocí vztahů uvedených v kapitole 2.6.2. Tato práce navazuje na diplomovou práci pana Ing. Michala Zelenky. Hlavní odlišnost této práce je ověřování vypínací charakteristiky jističe.

3.1 Kompaktní jistič X1

Kompaktní jistič X1 je modulární a vysoce proměnlivý přístroj, který se používá především k ochraně vedení proti přetížení a zkratu (obr. 21). Termomagnetická nadproudová spoušť jističe je vyrobena jako samostatný a vyměnitelný blok, ve kterém jsou zapouzdřené prvky termomagnetické spouště (obr. 22). V každém pólu je umístěn elektromagnet a bimetalový pásek. Hlavní parametry jističe X1 jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 21: Kompaktní jistič X1 [8]



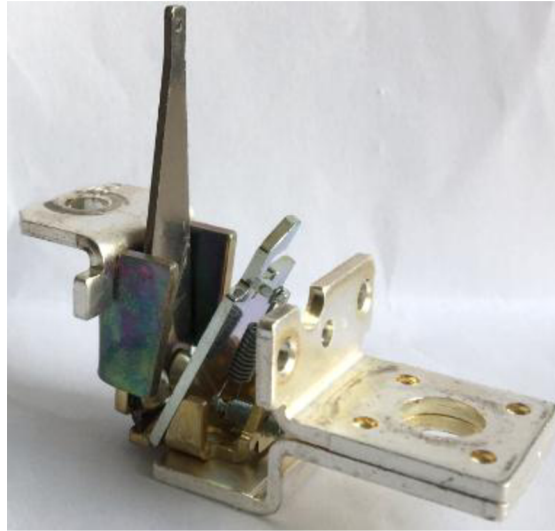
Obr. 22: Termomagnetická nadproudová spoušť jističe X1 [9]

Tab. 2: Parametry kompaktního jističe X1 [1] [9]

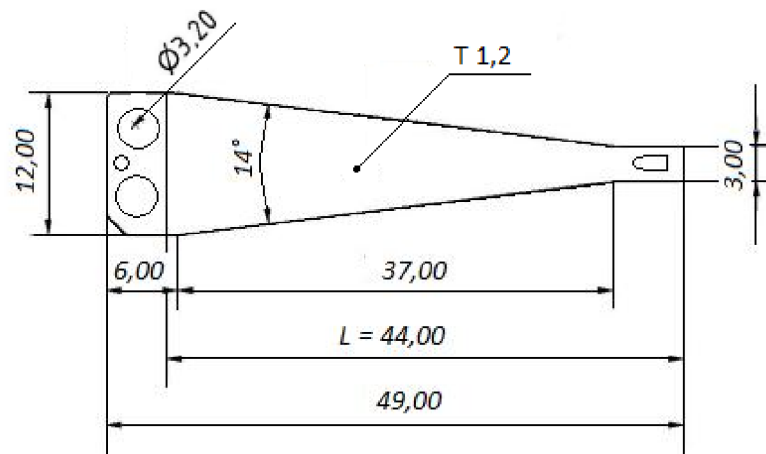
referenční teplota okolí	50 °C
kategorie užití	A
počet pólů	3
jmenovitý proud I_n	250 A
jmenovité pracovní napětí U_e	690 V a.c.
jmenovitý kmitočet f_n	50/60 Hz
jmenovité impulsní výdržné napětí U_{imp}	8kV
jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost I_{cu} při U_e	7 kA při 690 V (AC) 36 kA při 380/415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

Pro tepelnou spoušť je v každém pólu využit zkosený jednostranně připevněný bimetalový pásek typu Y1 s mezivrstvou z mědi (obr. 23). Vyhříván je nepřímo pomocí paralelně vedoucí proudovodné dráhy, ke které je připevněn pomocí nýtu. Procházel-li určitý nadproud dostatečně dlouhou dobu, dojde k nadměrnému ohřátí bimetalu. Důsledkem toho se bimetal prohne tak, že pomocí vybavovací lišty uvolní západku spínacího mechanismu. Základní geometrie bimetalu je uvedena na obr. 24 a jeho parametry jsou uvedeny v tab. 3. Elektromagnet ve zkratové spoušti je tvořen jhem a pohyblivou kotvou, která je oddalována od jha pružinou.

Vinutí elektromagnetu pak tvoří jeden průvlek v magnetickém obvodu, a to v místě, kde je k proudovodné dráze připojen bimetal.



Obr. 23: Jeden pól termomagnetické spouště

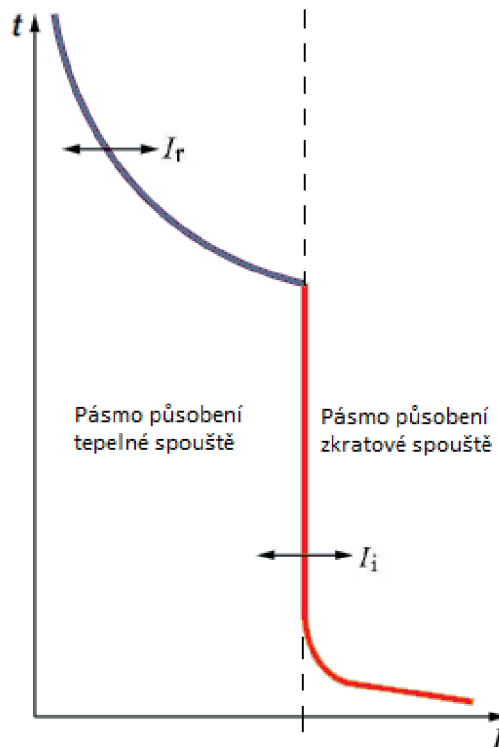


Obr. 24: Geometrie bimetalu [1]

Tab. 3: Parametry bimetalu YI [1] [2]

měrná tepelná kapacita (při 20 °C)	$c = 0,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
tepelná vodivost (při 20 °C)	$\lambda = 90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
maximální ohybové napětí (při 20 °C)	$\sigma_{max} = 200 \text{ MPa}$
modul pružnosti v tahu (při 20 °C)	$E = 145\,000 \text{ MPa}$
tvrdost aktivní vrstvy podle Vickerse	$HV = (180 \div 260)$
tvrdost pasivní vrstvy podle Vickerse	$HV = (190 \div 270)$
hustota (při 20 °C)	$\gamma = 8,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
maximální pracovní teplota	350 °C
teplotní rozsah pro průhyb	(-70 ÷ 250) °C
rozmezí linearity	(-20 ÷ 200) °C
měrný odpor (při 20 °C)	$\rho = 0,008 \mu\Omega \cdot \pm 10\%$
měrný tepelný průhyb (při 20 °C až 100 °C)	$a = 19,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
měrná tepelná křivost (při 20 °C až 130 °C)	$k = 37,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5\%$
materiál aktivní vrstvy	slitina MnCu18Ni10
materiál mezivrstvy	Cu
materiál pasivní vrstvy	slitina FeNi36 - Invar

Bimetal působí na vybavovací mechanismus nepřímo pomocí vybavovací lišty, kterou jsou mechanicky spřaženy jednotlivé spouště ze všech pólu jističe. Regulačním kotoučem tepelné spouště je možné posouvat vzdálenost spojovací lišty a měnit tak vzdálenost mezi konci bimetalů a lištou. Tak je možné nastavovat působení tepelné spouště v rozsahu $I_r = 0,7 \times I_n$ resp. $I_r = 175 \div 250 \text{ A}$. Podobně lze regulačním kotoučem zkratové spouště měnit vzdálenost mezi spojovací lištou a jhem elektromagnetu a regulovat tak vybavení spouště v rozsahu $I_i = 5 \div 10 \times I_n$, resp. $I_i = 1250 \div 2500 \text{ A}$. [1] [9]



Obr. 25: Vypínací charakteristika jističe XI [9]

3.2 Výchozí předpoklady pro výpočet

Pro výpočet bimetalu obecně platí podle kapitoly 2.6 tyto předpoklady:

- Při teplotě okolí T_1 je bimetalový pásek z homogenních materiálů přímý a je rovnoměrně ohříván proudem.
- Při teplotě T získává bimetalový pásek tvar kruhového oblouku se středním poloměrem ρ .
- Průhyb bimetalu je vyvolán silami F_1 a F_2 , které pásek natahují a stlačují, u těchto sil předpokládáme působení v těžišti průřezu pásku.
- Obdélníkový průřez bimetalového pásku se mění, tzn., že kulové zakřivení, které se ve skutečnosti vytváří, můžeme vzhledem ke štíhlosti zanedbat. [3]

Kromě těchto předpokladů, je pro výpočet volného průhybu v závislosti na oteplení uvažováno rovnoměrné oteplení bimetalového pásku ΔT v celém jeho objemu.

3.3 Výpočet volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

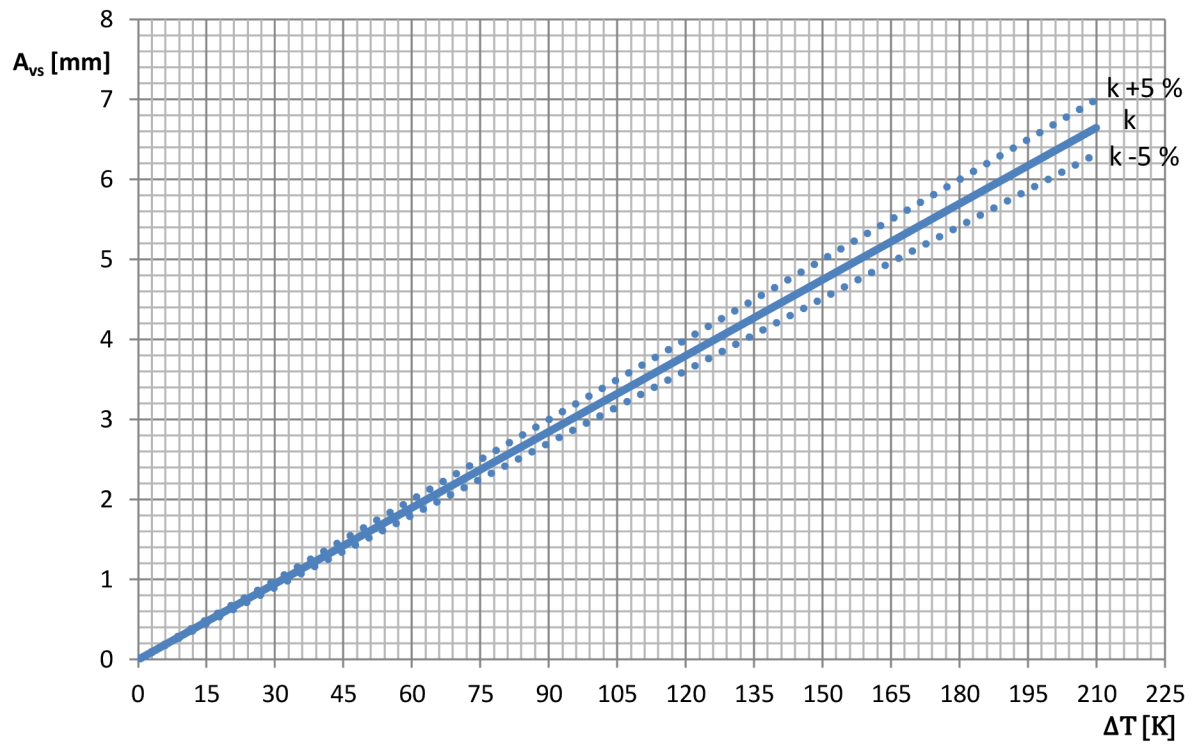
Volný průhyb A_v je materiálová vlastnost bimetalu závislá na teplotě. Měří se proto, aby se zjistilo jeho prohnutí při daném proudě, resp. kam až dosáhne a jak daleko může působit. Z obecného hlediska není závislý na šířce pásku. Z tohoto předpokladu lze pro výpočet volného průhybu bimetalového pásku Y1 použít vztah (24). Tloušťka bimetalového pásku podle obr. 24 je $s = 1,2$ mm a měrná tepelná křivost bimetalového pásku podle tab. 2 je $k = 37 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 5 \%$. Volný průhyb bimetalu například pro oteplení $\Delta T = 60$ K je:

$$A_{vs} = \frac{\alpha k \Delta T L^2}{s} = \frac{0,53 k \Delta T L^2}{s} = \frac{0,53 \cdot 37 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 44^2}{1,2} = 1,898 \text{ mm} \quad (33)$$

Vypočtené hodnoty volného průhybu bimetalu pro oteplení (0 ÷ 210) K při uvažování měrné tepelné křivosti $k = 37 \cdot 10^{-6} \pm 5 \%$ jsou uvedeny v tab. 4. Z těchto hodnot byla vytvořena grafická závislost (obr. 26)

Tab. 4: Výpočet volného průhybu bimetalu Y1 v závislosti na oteplení

ΔT	A_{vs}		
	k	k - 5 %	k + 5 %
[K]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0	0	0
15	0,476	0,450	0,499
30	0,949	0,901	0,991
45	1,423	1,352	1,498
60	1,898	1,803	1,998
75	2,372	2,254	2,497
90	2,847	2,705	2,997
105	3,321	3,155	3,496
120	3,796	3,606	3,996
135	4,271	4,057	4,495
150	4,745	4,508	4,995
165	5,220	4,959	5,494
180	5,694	5,409	5,994
195	6,169	5,860	6,494
210	6,643	6,311	6,993



Obr. 26: Teoretická závislost volného průhybu bimetalu Y1 na oteplení

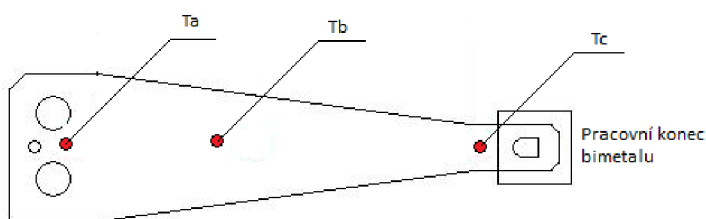
4 MĚŘENÍ BIMETALU

Úkolem měření bylo ověřit předchozí teoretický výpočet volného průhybu v závislosti na oteplení. Jedná se tedy o měření na kompaktním jističi X1 s termomagnetickou nadproudovou spouští. Měření bimetalu Y1 bylo provedeno na prostředním pólu nadproudové spouště. Pro rychlejší ohřev a přiblížení se reálným podmínkám byl jistič zapojen trojpólově do série. Měření bylo realizováno v laboratoři Vědecko-technického parku profesora Lista FEKT VUT v Brně.

4.1 Měření volného průhybu v závislosti na oteplení

4.1.1 Příprava na měření

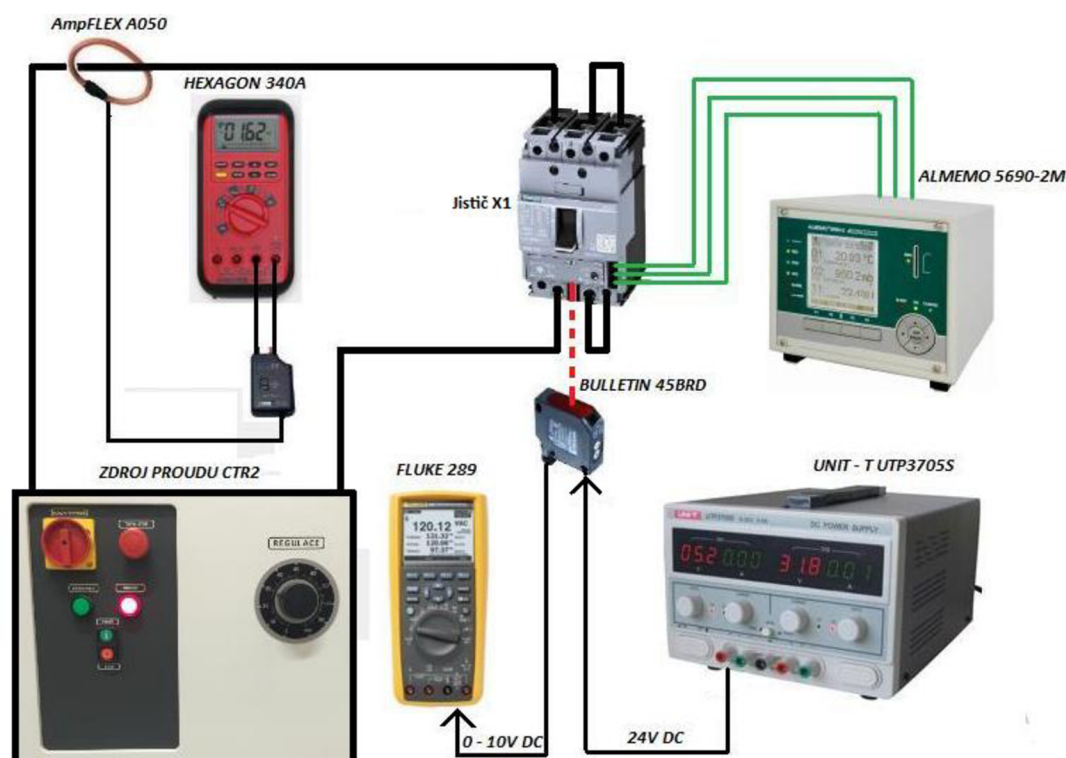
Kvůli poloze nadproudové spouště musel být jistič upraven vzhledem k záměru měření ze spodní strany. Nad prostřední přípojovací svorkou byl odřezán kus vnějšího plastového krytu a vyvrtán otvor pro snímání polohy plastové čepičky pracovního konce bimetalu. Otvor pro snímání polohy vzhledem k tenkosti plastu byl doladěn pilníkem. Pro měření teploty byly použity tři termočlánky typu K, které byly připevněny na povrch pasivní vrstvy bimetalu pomocí vysokoteplotní stříbrné pasty, která se vyznačuje dobrou teplotní vodivostí. První termočlánek je upevněn těsně pod čepičkou pracovního konce, druhý uprostřed a třetí do prostoru mezi nýty pevného konce (obr. 27). Protože vybavovací lišta je mechanicky spřažena pro všechny tři póly, byl z důvodu měření volného průhybu v závislosti na oteplení odstraněn prostřední vybavovací člen. Vzniklým otvorem na přední straně po odstranění vybavovacího členu byly vyvedeny všechny tři termočlánky. Plastová čepička pracovního konce bimetalu je z průhledného materiálu, a aby nedošlo ke zkreslení výstupních hodnot z laserového senzoru byla přelepena bílou lepicí páskou. Plastovým krytem byl jistič zapouzdřen a následně byla provedena izolace otvoru a případných netěsností lepicí páskou, a to pro omezení tepelných ztrát s okolním prostředím a následným chybám měření.



Obr. 27: Rozložení termočládku na pasivní vrstvě bimetalu Y1 pro měření teploty

Jistič byl upevněn na svislou desku a silovými vodiči připojen k proudovému zdroji. Fotoelektrický laserový senzor Bulletin 45BRD pro snímání polohy čepičky pracovního konce bimetalu byl umístěn pod jistič pomocí pohyblivého ramene upevněného na desce. Měřící rozsah senzoru je 45 až 85 mm. Senzor byl tedy upevněn ramenem na vzdálenost zhruba 70 - 75 mm od čepičky a paprsek laseru byl kolmo nastaven přímo na střed čepičky. Laserový senzor byl napájen ze stejnosměrného zdroje UNIT-T UTP3705S. Výstup z laserového senzoru, který nám měřící vzdálenost udává DC napětím, byl připojen k digitálnímu multimetru FLUKE 289.

Všechny tři termočlánky pro měření teploty bimetalu prostřednictvím konektorů ALMEMO ZA9000 FS3 byly připojeny k měřicí ústředně ALMEMO 5690-2M na vstupy M0, M1, M2. Při měření AC proudu byl na silový vodič, který vede k měřenému pólu, navlečen klešťový transformátor proudu AmpFLEX A050 a jeho analogový DC výstup pak byl připojen na digitální multimetr HEXAGON 340A. Schéma zapojení je zobrazeno na (obr. 28).



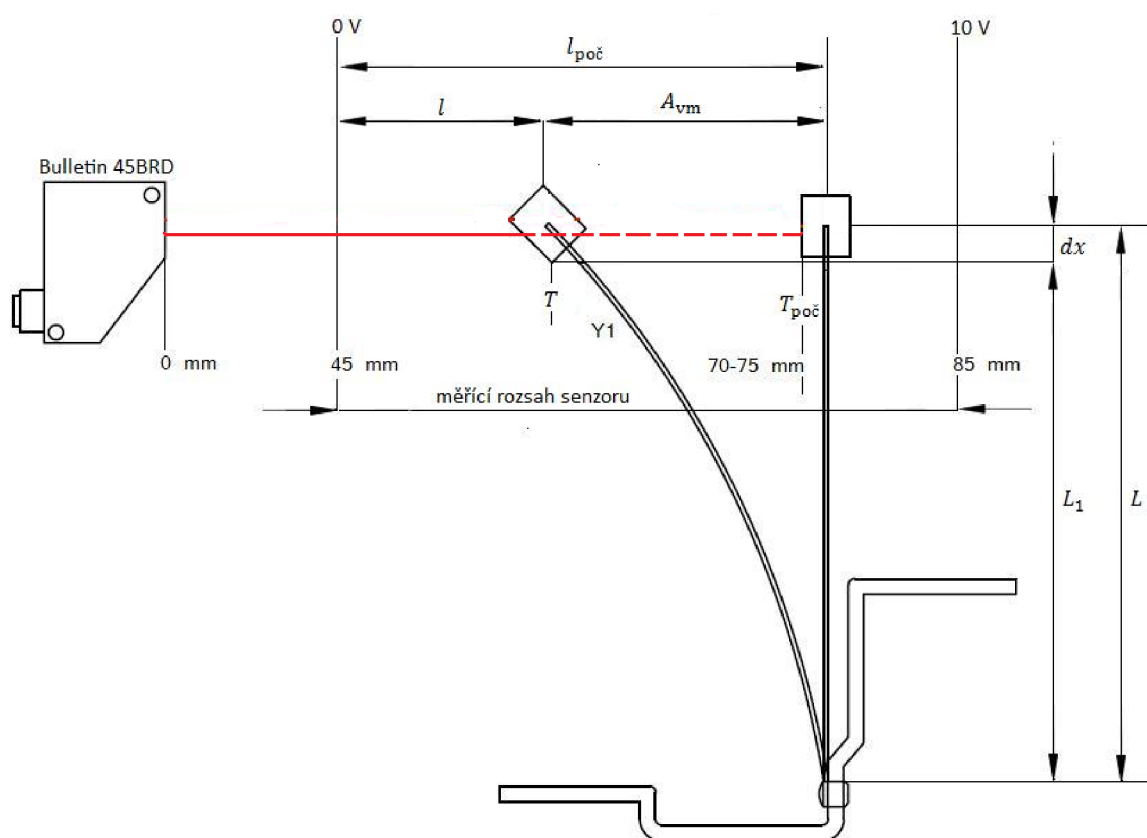
Obr. 28: Schéma zapojení pro měření volného průhybu

4.1.2 Postup měření

Před samotným měřením došlo ke kontrole zapojení a následně byly všechny měřicí přístroje připojeny k napájení. Kotoučem regulace tepelné spouště na jističi X1 byla nastavena nejnižší hodnota jmenovitého redukováného proudu $I_r = 175$ A. Měřicí ústřednou ALMEMO 5690-2M, ke které jsou připojeny termočlánky, byla změřena bez proudového zatížení počáteční teplota pracovního konce T_a střední části T_b a pevného konce T_c bimetalu. Napájecí napětí 24 V pro laserový senzor BULLETIN 45BRD bylo nastaveno pomocí stejnosměrného zdroje UNIT-T UTP3705S. Digitálním multimetrem FLUKE 289, připojeným na výstup senzoru, byla odečtena hodnota DC napětí, představující počáteční měřenou vzdálenost l_{poc} čepičky pracovního konce bimetalu při počátečních teplotách T_a , T_b a T_c . Kvůli měření závislosti oteplení a volného průhybu bimetalu na čase, byl spuštěn automatický záznam teploty na měřicí ústředně ALMEMO 5690-2M. Každou sekundu byly automaticky ukládány hodnoty teplot bimetalu na paměťovou kartu, vloženou do slotu v měřicí ústředně po celý čas měření.

Proud $I = 227,5$ A tj. $I = 1,3 \times I_n$, protékající měřeným pólem, byl nastaven pomocí proudového zdroje CTR 2 a digitálního multimetru HEXAGON 340A, který byl připojen ke klešťovému transformátoru proudu AmpFLEX A050. Při této smluvené hodnotě proudu podle

kapitoly 2.7 by mělo dojít k vybavení jističe do 2 hodin. Průchodem proudem se bimetal začal ohřívat. Pomocí termočlánků, připojených k měřicí ústředně ALMEMO 5690-2M, byly v určitých časových okamžicích zaznamenávány teploty bimetalu (T_a , T_b , T_c). Ve stejném okamžiku byla na digitálním multimetru FLUKE 289, připojeného na výstup laserového senzoru BULLETIN 45BRD, odečítána hodnota DC napětí, představující měřenou vzdálenost čepičky pracovního konce bimetalu (obr. 29). V průběhu celého měření byl proud protékající bimetalem regulován na hodnotě $I = 227,5$ A. S rostoucí teplotou roste průhyb bimetalu, který nakonec zapříčinil vybavení vybavovacího mechanismu a jističem tedy neprotékal žádný proud ($I = 0$ A). Stejným způsobem byl průhyb bimetalu měřen i po rozpojení obvodu vypínacím mechanismem, až došlo k ochlazení bimetalu přibližně na počáteční teplotu ($T_a \approx T_b \approx T_c$), která byla změřena před začátkem měření.



Obr. 29: Měření volného průhybu bimetalu

Po ochlazení bimetalu byla na digitálním multimetru FLUKE 289 odečtena hodnota DC napětí, představující novou počáteční měřenou vzdálenost l_{poc} čepičky při nových počátečních teplotách T_a , T_b a T_c . Proud $I = 183,75$ A tj. $I = 1,05 \times I_n$ protékající měřeným polem, byl nastaven pomocí proudového zdroje CTR 2 a digitálního multimetru HEXAGON 340A, který byl připojen ke klešťovému transformátoru proudu AmpFLEX A050. Při této smluvené hodnotě proudu podle kapitoly 2.7 by nemělo dojít k vybavení jističe do 2 hodin. Při následném měření s proudem $I = 183,75$ A byla změřena teplota bimetalu i vzdálenost čepičky, jak pro ohřev, tak i chladnutí stejným způsobem jako v předcházejícím případě.

Změřené hodnoty DC napětí z výstupu laserového senzoru byly multimetrem FLUKE 289 převedeny na odpovídající vzdálenost l čepičky. Z naměřených teplot T_a , T_b a T_c byla stanovena průměrná teplota bimetalového pásku T . Pro oba dva proudy, byla z naměřených hodnot sestrojena grafická závislost volného průhybu bimetalu A_{vm} na oteplení ΔT pro ohřev i ochlazování. Naměřené hodnoty teplot T_a , T_b a T_c pro oba dva proudy, uložené na paměťové kartě, byly převedeny do formátu Microsoft Office Excel a následně byla graficky sestrojena oteplovací charakteristika (závislost oteplení na čase) bimetalového pásku. Pomocí změřené závislosti oteplovací charakteristiky a volného průhybu na oteplení, byla rovněž sestrojena grafická závislost volného průhybu na čase. Veškeré údaje (tabulky naměřených, vypočtených hodnot atd.) jsou uvedeny v příloze.

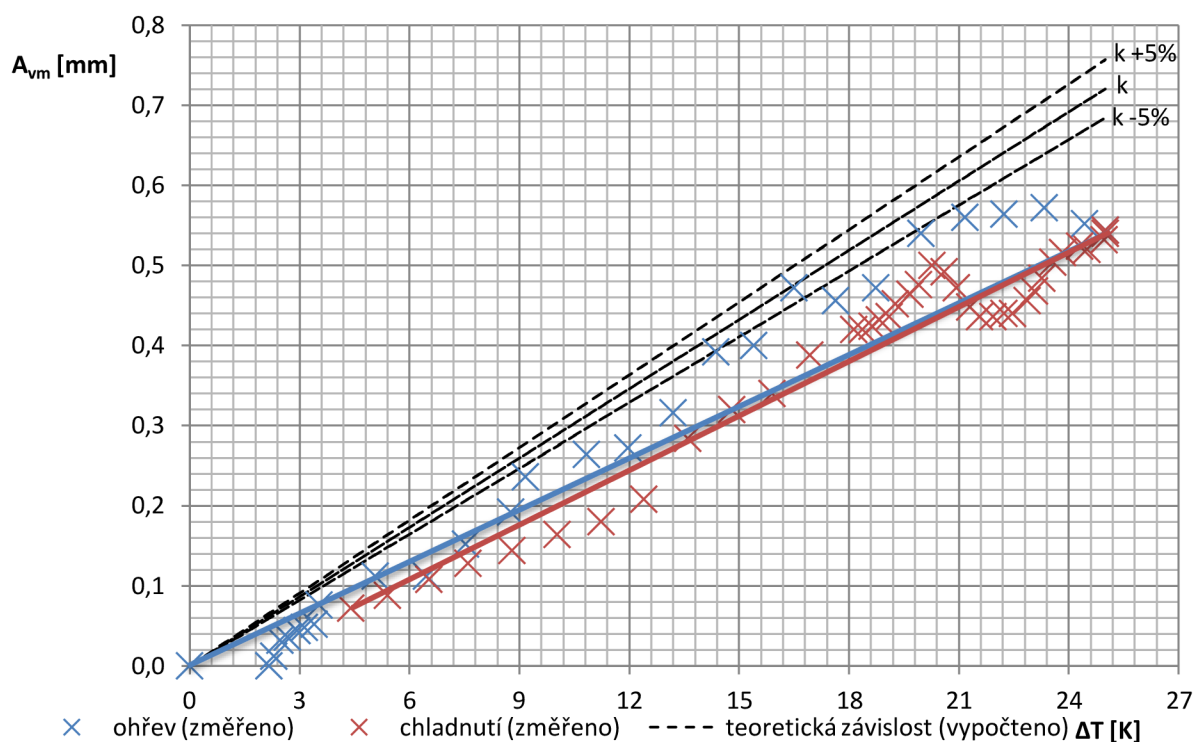
V teoretickém výpočtu volného průhybu bimetalu (kapitola 3.3) byla uvažována délka $L = 44$ mm, ale při výpočtu teoretického průhybu A_{vs} je potřeba, vzhledem ke způsobu měření, uvažovat délku L_1 . Kromě hlediska teoretického výpočtu, průhyb terčíku A_{vm} odpovídá průhybu bimetalu pouze pro délku L_1 . Se zvětšujícím se průhybem roste délka dx a vzdálenost L_1 se zkracuje. Z důvodu možnosti porovnání změřených a teoretických získaných hodnot, není při výpočtu teoretického průhybu A_{vs} uvažována zanedbatelná vzdálenost dx . Vzdálenost L_1 byla změřena při počáteční teplotě $T_{poč}$ ($L = 42$ mm), kde je tato hodnota považována za konstantní a nadále se s ní pracuje při výpočtu teoretického průhybu A_{vs} (Příloha).

4.1.3 Použité měřicí přístroje

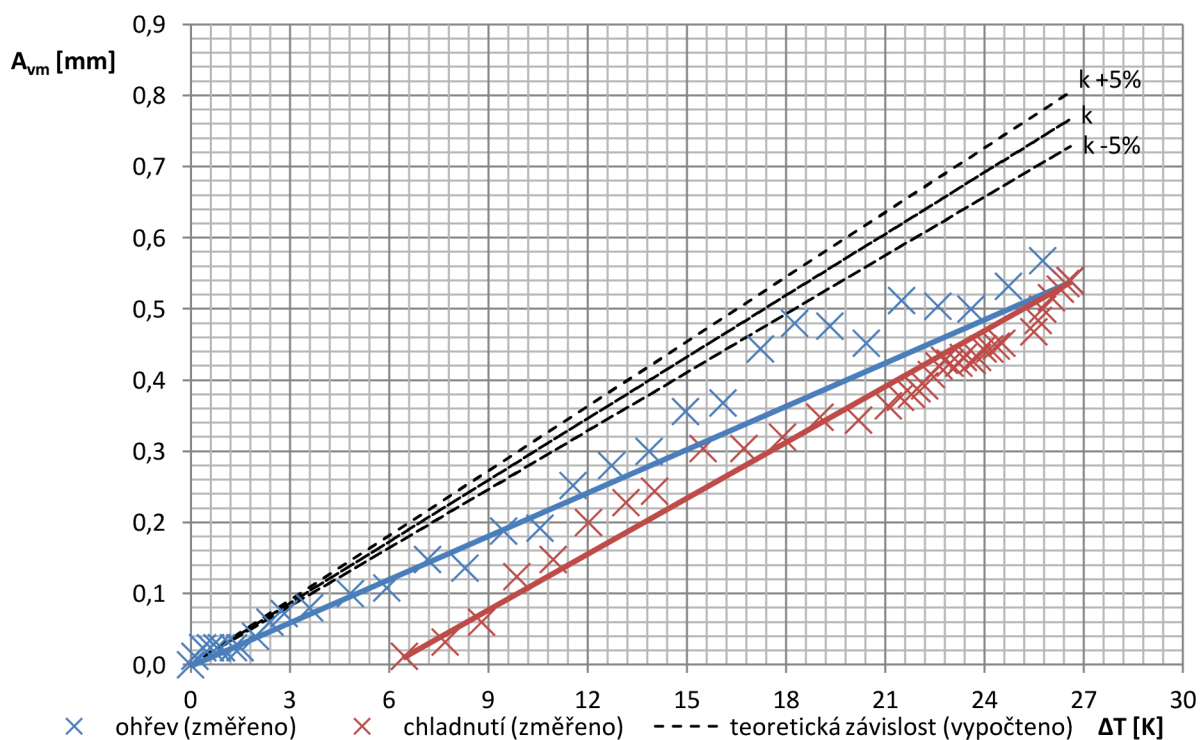
Tab. 5: Seznam použitých přístrojů pro měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

Název	Typ	Technické informace	Výrobní číslo	Výrobce
Zdroj proudu	CTR 2	-	SAP: 000000317341- 0000	KPB INTRA
Klešťový transformátor proudu AmpFLEX	A050	měření AC proud vodičů - rozsah 0-300/3000 A - rozlišení 1 A = 10/1 mV - přesnost $\pm 1 \%$ [10]	SAP: 001000213340- 0000	CHAUVIN ARNOUX
Multimetr HEXAGON	340A	- při 50 Hz přesnost AC napětí $\pm (0,5 \%$ ze čtení + 3digit) v celém rozsahu měření [11]	MFR.#: 122180534	AMPROBE
Multimetr FLUKE	290	- rozlišení 0,0001 V - přesnost $\pm (0,025 \%$ ze čtení + 3digit) [12]	SAP: 001000174924- 0000	FLUKE
Fotoelektrický laserový senzor BULLETIN	45BRD	- provozní rozsah 45÷85 mm - měřicí rozsah 40 mm - rozlišení 20 μm - DC výstup 0 ÷ 10 V - 0 V při 45 mm; 10 V při 85 mm [13]	45BRD-8JKB1 D4 Ser A	ALLEN- BRADLEY
Měřicí ústředna ALMEMO	5690-2M	- 10 galvanických oddělených vstupů pro termočlánky - 9 primárních kanálů - maximální vzorkovací frekvence 50 Hz [14]	Nr.: A12110214	AHLBORN
Laboratorní zdroj UNIT-T	UTP3705S	2 x DC výstup 0 ÷ 32, 0 ÷ 5 A - při konstantním napětí odchylka $\geq 1 \times 10^{-4} + 2 \text{ mV}$ ($\pm 10 \%$ z napěťového rozsahu) [15]	815020792	UNI- TREND
3x konektor ALMEMO	ZA9000 FS3	- pro připojení termočlánků a dalších napěťových signálů k měřicí ústředně ALMEMO - rozlišení 1 mV - DC napětí $\pm 2,6 \text{ V}$ - přesnost $\pm 3 \%$ ze čtení [16]	-	AHLBORN
3x Termočlánek	K	- rozsah -200÷1250 °C - přesnost 0,75 % [17]	-	-

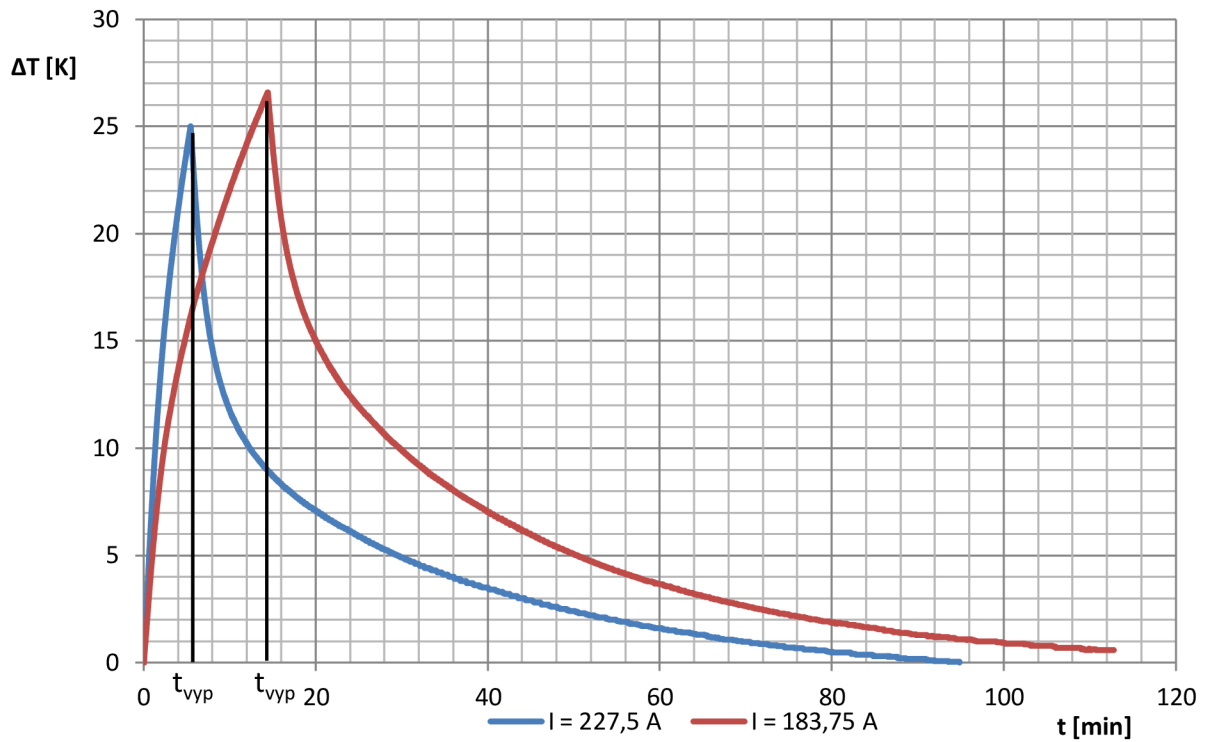
4.1.4 Změřené závislosti



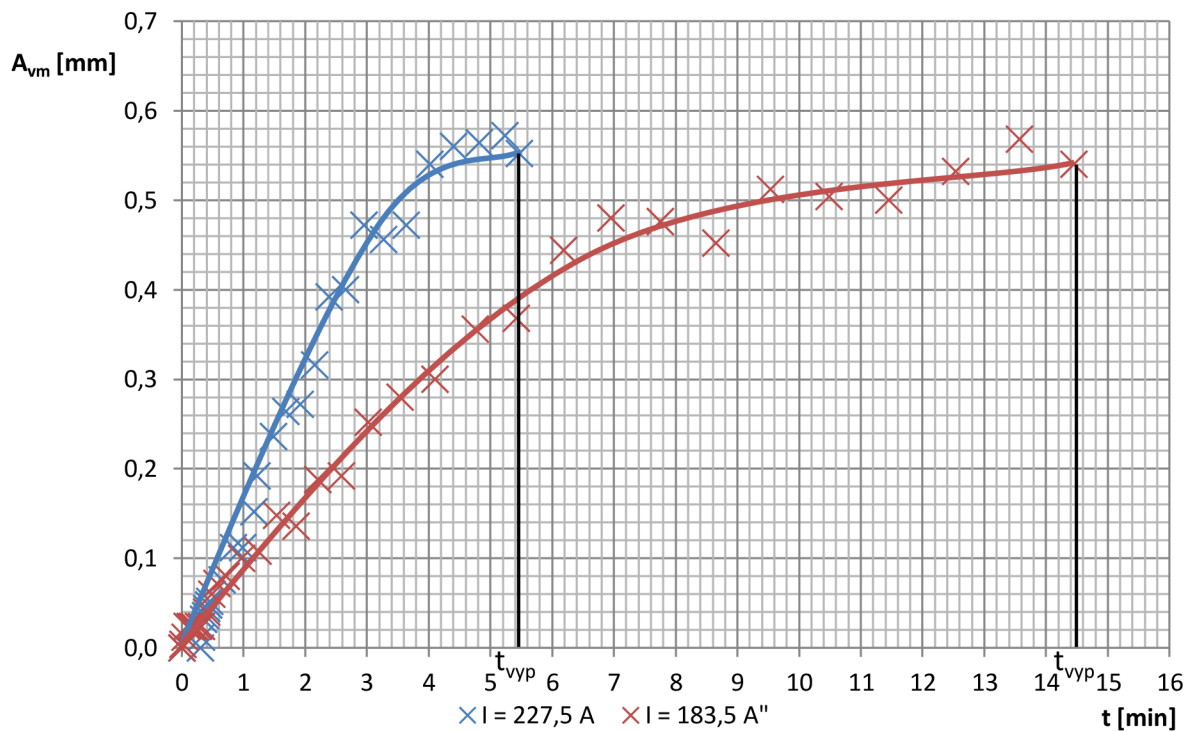
Obr. 30: Změřená závislost volného průhybu bimetalu Y1 na oteplení při proudu $I = 227,5 A$



Obr. 31: Změřená závislost volného průhybu bimetalu Y1 na oteplení při proudu $I = 183,75 A$



Obr. 32: Změřená závislost okamžitého průměrného oteplení bimetalu Y1 na čase



Obr. 33: Změřená závislost volného průhybu bimetalu Y1 na čase

4.1.5 Zhodnocení měření

Z naměřených hodnot volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení, které jsou uvedeny v příloze a sestrojeny v grafických závislostech (obr. 30 a obr. 31) je vidět, že se zvětšujícím se oteplením (ohřívání proudy $I = 1,3 \times I_n = 227,5 \text{ A}$ a $I = 1,05 \times I_n = 183,75 \text{ A}$) a následným chladnutím úměrně roste volný průhyb bimetalu. Nejvyšší naměřená průměrná teplota bimetalového pásku, kdy došlo k vybavení přístroje vybavovacím mechanismem při ohřívání proudem $I = 227,5 \text{ A}$ je $T = 48,30^\circ\text{C}$ a při ohřívání proudem $I = 183,75 \text{ A}$ je $T = 49,60^\circ\text{C}$. Celý rozsah naměřených teplot oběma proudy se tedy nachází v tzv. rozmezí linearity $(-20 \div 200)^\circ\text{C}$ udávané výrobcem bimetalového pásku. Naměřená hodnota volného průhybu bimetalu A_{vm} se v rozmezí linearity neměla lišit od teoretické vypočtené správné hodnoty pomocí měrné tepelné křivosti k (udávaná výrobcem) o více než $\pm 5\%$ jak pro ohřívání, tak i chladnutí. Rozdíl naměřené hodnoty volného průhybu A_{vm} při proudy $I = 227,5 \text{ A}$ se liší od teoretické hodnoty A_{vs} o $(0 \div 213,5)\%$ při ohřívání a $(0 \div 316,3)\%$ pro chladnutí. Při proudy $I = 183,75 \text{ A}$ je rozdíl $(0 \div 516,3)\%$ při ohřívání a $(0 \div 452,2)\%$ pro chladnutí. Naměřená závislost $A_{vm} = f(\Delta T)$ tedy neodpovídá teoretické závislosti $A_{vs} = f(\Delta T)$ získané z teoretického výpočtu při uvažování aktivní délky $L = 42 \text{ mm}$.

Z naměřených hodnot oteplení bimetalu na čase, které jsou uvedeny v příloze, a sestrojených grafických závislostí (obr. 32) je vidět, že rychlost oteplení závisí na velikosti procházejícího proudu. Vzhledem k ověření vypínací charakteristiky jističe nedošlo při ohřevu oběma proudy k ustálenému oteplení, neboť při určitém oteplení, vybavovací mechanismus vybavil přístroj, a tím došlo k okamžitému ochlazování. Při ohřívání proudem $I = 1,3 \times I_n = 227,5 \text{ A}$ došlo k vybavení přístroje v čase $t_{vyp} = 5,47 \text{ min}$ a nejvyšší zaznamenané průměrné oteplení v tomto čase je $\Delta T = 25 \text{ K}$. Podle kapitoly 2.7 by měl tento proud vybavit přístroj podle smlouvené doby do 2 hodin. V tomto případě je podmínka splněna. Při ohřívání proudem $I = 1,05 \times I_n = 183,75 \text{ A}$ došlo k vybavení přístroje v čase $t_{vyp} = 14,45 \text{ min}$ a nejvyšší zaznamenané průměrné oteplení v tomto čase je $\Delta T = 26,60^\circ\text{C}$. Podle kapitoly 2.7 by tento proud neměl vybavit přístroj podle smlouvené doby do 2 hodin. V tomto případě podmínka není splněna.

Z obr. 33 závislost volného průhybu bimetalu na čase je vidět, že s časem exponenciálně roste průhyb bimetalu. Nejvyšší naměřená hodnota průhybu, kdy bimetal začal působit na vybavovací mechanismus a vybavil přístroj při ohřívání proudem $I = 227,5 \text{ A}$ je $A_{vm} = 0,552 \text{ mm}$, kterému odpovídá čas $t_{vyp} = 5,47 \text{ min}$. Při ohřívání proudem $I = 185,5 \text{ A}$ je $A_{vm} = 0,540 \text{ mm}$, kterému odpovídá čas $t_{vyp} = 14,45 \text{ min}$. Je tedy zřejmé, že při větší hodnotě nadproudu roste průhyb rychleji a čas, při kterém dojde k vybavení, se zkracuje. Odpovídá to tedy skutečnosti, že tepelná spoušť je časově závislá. Všechny chyby měření jsou souhrnně popsány v kapitole 4.1.6.

4.1.6 Chyby měření

Měření bylo ovlivněno těmito chybami:

- Při vyhodnocení měření je uvažován aritmetický průměr změřených teplot T_a , T_b a T_c . Ve skutečnosti je teplota bimetalového pásku rozložena nerovnoměrně.
- Při měření závislosti volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení nebylo DC napětí, které představuje vzdálenost l čepičky, odečítáno na multimetru FLUKE 289 ve stejném okamžiku jako hodnoty teplot T_a , T_b a T_c na měřicí ústředně ALMEMO 5690 – 2M.
- Kvůli postupnému nárůstu oteplení proudovodné dráhy (zvyšující se odpor) u měření volného průhybu v závislosti na oteplení, lehce klesala hodnota procházejícího proudu. Proto bylo nutné proud v některých momentech korigovat na požadovanou hodnotu.
- Při tomto měření je bimetalový pásek považován za rovný při teplotě „za studena“, ($T_a \approx T_b \approx T_c \approx T_{poč}$) resp. bez proudového zatížení. Výrobce bimetalového pásku však uvádí, že pásek je rovný při teplotě $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Ve chvíli, kdy došlo k vybavení přístroje, bimetal ještě vydává tepelnou setrvačností z ohřívání tepelnou energii, která zvyšuje prostorové teplo v okolních částech jističe.
- Použitý jistič je vývojový kus, který při testování neprošel příslušnými zkouškami.
- Nepřesnost jednotlivých měřících přístrojů.

5 ZÁVĚR

V této práci jsme byli seznámeni s principem tepelné nadproudové spouště a možných konstrukčních řešení. Hlavním účelem bylo se zaměřit na bimetal - hlavní prvek tepelné nadproudové spouště. Mimo materiálů, které jsou nejvhodnější k výrobě bimetalu, jsou zde také podrobně analyzovány parametry bimetalu potřebné k jeho návrhu. Dále se seznamujeme s elementárními výpočty bimetalového prvku a souhrnem matematických vztahů pro výpočet nejčastěji používaných řešení.

Hlavní část je věnována praktické, kde podle zadání byl zpracován teoretický výpočet tepelné spouště pro bimetal Y1, zahrnutý v termomagnetické nadproudové spoušti jističe X1. Součástí teoretického výpočtu byl stanoven volný průhyb bimetalu v závislosti na oteplení. Výpočet byl proveden podle parametrů, které udává výrobce bimetalového pásu a výpočetních vztahů, uvedených v předcházející části práce.

Vypracovaný teoretický výpočet byl podle dalšího bodu zadání ověřen měřením. Byla změřena závislost volného průhybu bimetalu Y1 v závislosti na oteplení, závislost oteplení na čase, při které byla ověřena vypínací charakteristika jističe a závislost volného průhybu na čase. Důkladně byla popsána příprava a postup tohoto měření. V poslední části je provedeno vyhodnocení měření, kde naměřené hodnoty byly srovnány s hodnotami získanými z teoretického výpočtu.

LITERATURA

- [1] ZELENKA, M. *Analýza bimetalové spouště* [online]. BRNO, 2015 [cit. 2016-04-24]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101806
- [2] UHLIG, Wolfgang. *Thermostatic Metal: Manufacture and Application*. 2. vyd. Aue/Sachsen (Germany): Auerhammer Metallwerk GmbH, 2007. OCLC 316051590
- [3] *Thermostatic Bimetal Handbook*. 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>
- [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] *Příručka: Nadproudové spouště*. Letohrad: OEZ, 2012 [cit. 2014-11-22]. ISBN JS1-2012-C. Dostupné z: <http://www.oez.cz/file/595/download/>
- [7] Jistič ABB 1P B16 compact home. *Elektric HRANICE* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.pristroje-abb.cz/jistic-abb-1p-b16-compact-home-310.html>
- [8] *SIEMENS* [online]. 2013, 8s [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/210/92189210/att_830423/v1/20140623_A5E03456789020-04_emb_201502161454069476.pdf
- [9] 3VA Molded Case Circuit Breakers. In: *SIEMENS* [online]. 2014, 196 s. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://w5.siemens.com/web/ua/ru/low-voltage/download/Documents/3VAMoldedCaseCircuitBreakers_EN_3152.pdf
- [10] Klešťový proudový adaptér Chauvin Arnoux AmpFLEX A050. *Conrad Electronic Česká republika* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/klestovy-proudovy-adapter-chauvin-arnoux-ampflex-a050.k124182>
- [11] Digitální multimetr Hexagon - Amprobe 340A. *AMT měřicí technika* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.amt.cz/index.php?id=HEX340>
- [12] Digitální multimetr Fluke 289, Fluke 289/FVF2. *AMT - měřicí technika* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.amt.cz/index.php?id=FLUKE289>



- [13] Installation Instructions Bulletin 45BRD Analog Laser Sensor. *Rockwell Automation: Allen-Bradley* [online]. 2006, 4 s [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/45brd-in001_-en-p.pdf
- [14] ALMEMO 5690-2M měřicí ústředna až se 100 univerzálními měřícími vstupy. *AHLBORN* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.cz/pristroje/merici-ustredny-almemo/almemo-5690-2m-merici-ustredna-az-se-100-univerzalnimi-mericimi-vstupy.html>
- [15] Laboratorní zdroj UNI-T UTP3705S 2x0-32V/5A. *GES electronics* [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/laboratorni-zdroj-uni-t-utp3705s-2x0-32v-5a-GES07507733.html>
- [16] 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
- [17] 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>



PŘÍLOHY

Měření volného průhybu bimetalu v závislosti na oteplení

- Tabulky naměřených a vypočtených hodnot
- Příklad výpočtu
- Fotografie měření