



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

PŮSOBENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU NA KONTAKTNÍ DVOJICI

EFFECTS OF ELECTRICAL CURRENT ON CONTACT PAIR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Píšala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jan Píšala

ID: 164363

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Působení elektrického proudu na kontaktní dvojici

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rozeberte problematiku kontaktního styku v elektrických přístrojích.
2. Teoreticky analyzujte kontaktní styk na předloženém přípravku.
3. Na předloženém přípravku změřte průběh oteplení elektrického kontaktu.
4. Výsledky měření a teoretické analýzy porovnejte a zhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HAVELKA, Oto. Elektrické přístroje I. Praha: SNTL, 1985.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. Elektrické stroje a přístroje. 2. vydání. Praha: SNTL, 1957.
- [3] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí. Praha: SNTL, 1956.
- [4] KASSMAN RUDOLPHI, Asa. Tribology of electrical contacts: deterioration of silver coated copper. Uppsala: Uppsala University, 1996, 33 s.
- [5] BRAUNOVIC, Milenko, Valery KONCHITS a Nikolai MISCHKIN. Electrical contacts: Fundamentals, Applications and Technology [online]. Boca Raton: CRC Press, 2006 [cit. 2015-10-12]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=YTjMBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. David Šimek

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

Bakalářská práce je zaměřena na teoretický rozbor problematiky účinků elektrického proudu v kontaktní dvojici. Cílem je poukázat na tepelné a silové jevy, jež elektrický proud v kontaktu způsobuje, a jejich vliv na stykový odpor a odolnost dvojice. Tyto jevy jsou následně názorně demonstrovány na laboratorním přípravku, umožňujícího měření oteplení kontaktů. Závěrem práce je vyhodnocení tohoto měření a popis úprav laboratorního přípravku vedoucích k jeho zdokonalení.

Abstract

Bachelor's thesis is focused on the theoretical analysis of effects of electrical current on contact pair. An aim is showing of heat and strength phenomena, which are caused by electrical current, and their influence to contact and abrasion resistance. This phenomena are demonstrated on laboratory preparation for measurement of heating of contacts. In the end of this thesis is an evaluation of measurement and description of adjustments, which led to its improvement.

Klíčová slova

Kontaktní dvojice; elektrický kontakt; oteplení kontaktů.

Keywords

Contact pair; electrical contact; heating of contacts.

Bibliografická citace

PÍŠALA, J. *Působení elektrického proudu na kontaktní dvojici*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 87 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Šimek.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Působení elektrického proudu na kontaktní dvojici 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. Davidu Šimkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	13
1 ÚVOD.....	14
2 ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU.....	15
2.1 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU (ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY).....	15
2.2 TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU.....	18
2.3 ELEKTRICKÉ VÝBOJE	20
3 KONTAKTNÍ DVOJICE	23
3.1 POŽADAVKY NA KONTAKTY	23
3.2 STYKOVÝ ODPOR KONTAKTŮ	23
3.2.1 ÚŽINOVÝ ODPOR KONTAKTŮ	24
3.2.2 PŘECHODOVÝ ODPOR CIZÍCH VRSTEV	26
3.3 ODOLNOST KONTAKTŮ, VYPÍNAČÍ SCHOPNOST	28
3.3.1 MECHANICKÁ ODOLNOST	28
3.3.2 ODOLNOST PROTI SVAŘENÍ	28
3.3.3 ODOLNOST PROTI OPALU OBLOUKEM	32
3.3.4 VYPÍNAČÍ SCHOPNOST	33
3.4 MATERIÁLY KONTAKTŮ	33
3.4.1 UŠLECHTILÉ KOVY	34
3.4.2 POLOUŠLECHTILÉ KOVY	34
3.4.3 NEUŠLECHTILÉ KOVY	35
3.4.4 SLITINY	35
3.4.5 PRÁŠKOVÉ HMOTY	36
4 MĚŘENÍ OTEPLENÍ KONTAKTŮ.....	37
4.1 ÚVOD.....	37
4.2 POPIS PŘÍPRAVKU	37
4.3 TEORETICKÝ VÝPOČET.....	38
4.3.1 VÝPOČET PŘÍTLAČNÉ SÍLY KONTAKTŮ	38
4.3.2 VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL	39
4.3.3 VÝPOČET STATICKÉHO VALIVÉHO ODPORU	40
4.3.4 VÝPOČET SLOŽEK TÍHOVÉ SÍLY	40
4.3.5 VÝPOČET STYKOVÉHO ODPORU	41
4.3.6 PREDIKCE VÝSKYTU JEVŮ V KONTAKTECH - MĚKNUTÍ A SVAŘENÍ	42
4.4 MĚŘENÍ OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKY	43
4.4.1 TEORETICKÝ PRŮBĚH.....	45
4.4.2 SKUTEČNÝ PRŮBĚH - VYHODNOCENÍ.....	45
4.4.3 CHYBY MĚŘENÍ.....	46
4.5 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	48



5 TEORETICKÝ VÝPOČET OTEPLENÍ PŘÍPRAVKU	49
5.1 VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU OTEPLENÍ PŘÍVODNÍHO VODIČE	49
5.1.1 PŘEPOČET MĚRNÉHO ODPORU NA PŘEDPOKLÁDANOU TEPLITU	49
5.1.2 URČENÍ KOEFICIENTU ZHUŠTĚNÍ PROUDNIC	50
5.1.3 URČENÍ ČINITELE SKINEFEKTU	50
5.1.4 VÝPOČET STŘEDNÍ DÉLKY PROUDOVDNÉ DRÁHY V PŘÍVODNÍM VODIČI	50
5.1.5 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU PŘÍVODU	51
5.1.6 URČENÍ EMISIVITY POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	51
5.1.7 URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI POVRCHU	51
5.1.8 VÝPOČET CHLADÍČÍ PLOCHY	52
5.1.9 VÝPOČET VELIKOSTI CHLADÍČÍHO OBVODU	53
5.1.10 VELIČINY NÁHRADNÍHO Π -ČLÁNKU PŘÍVODNÍHO VODIČE	53
5.1.11 ČÁSTI NEPROTÉKANÉ PROUDEM – CHLADIČ ZA TRUBKOU	53
5.1.12 NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA PŘÍVODNÍHO VODIČE	54
5.2 VÝPOČET OTEPLENÍ TRUBKY	54
5.2.1 PŘEPOČET MĚRNÉHO ODPORU NA PŘEDPOKLÁDANOU TEPLITU	55
5.2.2 URČENÍ STŘEDNÍ DÉLKY PROUDOVDNÉ DRÁHY V TRUBCE	55
5.2.3 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU TRUBKY	55
5.2.4 URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI POVRCHU	55
5.2.5 VÝPOČET CHLADÍČÍ PLOCHY	56
5.2.6 VÝPOČET VELIKOSTI CHLADÍČÍHO OBVODU	56
5.2.7 VELIČINY NÁHRADNÍHO Π -ČLÁNKU TRUBKY	56
5.2.8 KONCE TRUBKY NEPROTÉKANÉ PROUDEM = CHLADIČ	56
5.2.9 NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA TRUBKY	57
5.3 VÝPOČET OTEPLENÍ KRAJNÍHO PŘÍVODNÍHO VODIČE	58
5.3.1 DÉLKA PROUDOVDNÉ DRÁHY	58
5.3.2 PŘEPOČET REZISTIVITY MĚDI PRO OTEPLENÍ 40 K	58
5.3.3 PLOCHA CHLAZENÍ	58
5.3.4 URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI POVRCHU	58
5.3.5 NOMINÁLNÍ PRŮŘEZ PŘÍVODU	59
5.3.6 VELIČINY NÁHRADNÍHO Π -ČLÁNKU KRAJNÍHO PŘÍVODNÍHO VODIČE	59
5.3.7 DÍLČÍ ČÁST PRO TEPELNÉ SCHÉMA	59
5.4 VÝPOČET OTEPLENÍ PRACOVNÍHO KONTAKTNÍHO STYKU	60
5.4.1 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU VE STYKU	60
5.4.2 REZISTIVITA CU PŘI OTEPLENÍ O 150 K	60
5.4.3 VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU VE STYKU	60
5.4.4 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT VE STYKU	60
5.4.5 DÍLČÍ ČÁST PRO TEPELNÉ SCHÉMA	60
5.5 VÝPOČET OTEPLENÍ ŠROUBOVÉHO STYKU	61
5.5.1 VÝPOČET PŘÍTLAČNÉ SÍLY	61
5.5.2 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU VE ŠROUBOVÉM STYKU	61
5.5.3 VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU VE STYKU	61
5.5.4 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT VE ŠROUBOVÉM STYKU	62
5.5.5 NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA PRO ŠROUBOVÝ STYK	62
5.6 VÝSLEDNÉ TEPELNÉ SCHÉMA	62
5.7 VYHODNOCENÍ TEORETICKÉHO VÝPOČTU	64



6 MĚŘENÍ OTEPLENÍ KONTAKTŮ PO ÚPRAVĚ PŘÍPRAVKU.....	65
6.1 POPIS ÚPRAVY LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU	65
6.2 TEORETICKÝ VÝPOČET PŘÍTLAČNÉ SÍLY KONTAKTŮ	66
6.2.1 VÝPOČET TÍHOVÉ SÍLY.....	66
6.2.2 VÝPOČET STYKOVÉHO ODPORU.....	66
6.3 MĚŘENÍ OTEPLOVACÍ CHARAKTERISTIKY	67
6.3.1 TEORETICKÝ PRŮBĚH.....	67
7 TEORETICKÝ VÝPOČET OTEPLENÍ PO ÚPRAVĚ PŘÍPRAVKU.....	71
7.1 PŘEPOČET OTEPLENÍ PŘÍVODNÍHO VODIČE.....	71
7.1.1 PŘEPOČET MĚRNÉHO ODPORU PRO OTEPLENÍ 50 K	71
7.1.2 URČENÍ KOEFICIENTU ZHUŠTĚNÍ PROUDNIC	71
7.1.3 VÝPOČET STŘEDNÍ DÉLKY PROUDOVODNÉ DRÁHY V PŘÍVODNÍM VODIČI	72
7.1.4 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU PŘÍVODU	72
7.1.5 URČENÍ NÁHRADNÍ CHLADIVOSTI POVRCHU	72
7.1.6 VÝPOČET CHLADÍČÍ PLOCHY	72
7.1.7 VÝPOČET VELIKOSTI CHLADÍČÍHO OBVODU	72
7.1.8 VELIČINY NÁHRADNÍHO Π -ČLÁNKU PŘÍVODNÍHO VODIČE.....	72
7.1.9 ČÁSTI NEPROTÉKANÉ PROUDEM – CHLADIČ ZA TRUBKOU	73
7.1.10 PŘEPOČÍTANÉ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA PŘÍVODNÍHO PASU.....	73
7.2 PŘEPOČET OTEPLENÍ TRUBKY	74
7.2.1 PŘEPOČET MĚRNÉHO ODPORU NA OTEPLENÍ 150 K.....	74
7.2.2 KONCE UPRAVENÉ TRUBKY NEPROTÉKANÉ PROUDEM = CHLADIČ	74
7.2.3 PŘEPOČÍTANÉ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA TRUBKY	75
7.3 PŘEPOČET OTEPLENÍ PRACOVNÍHO KONTAKTNÍHO STYKU	75
7.3.1 VÝPOČET ELEKTRICKÉHO ODPORU.....	75
7.4 VÝSLEDNÉ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SCHÉMA.....	75
7.5 VYHODNOCENÍ TEORETICKÉHO VÝPOČTU	77
8 ZÁVĚR.....	78
LITERATURA.....	79
PŘÍLOHY.....	80



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2. 1: Působení elektrodynamických sil na dvojici vodičů protékanych proudem</i>	15
<i>Obr. 2. 2: Flemingovo pravidlo levé ruky</i>	16
<i>Obr. 2. 3: Odpudivá síla na čelním kontaktu</i>	17
<i>Obr. 2. 4: Přitažlivé a odpudivé síly na kontaktním páru</i>	18
<i>Obr. 2. 5: Oteplovací a ochlazovací charakteristika</i>	19
<i>Obr. 2. 6: Charakteristika výbojů</i>	21
<i>Obr. 3. 1: Mikroskopická podoba místa styku</i>	24
<i>Obr. 3. 2: Závislost stykového odporu na přitlaku kontaktů. [1]</i>	27
<i>Obr. 3. 3: R/U diagramy: a) pro měď, b) pro slitinu Ag-CdO. [1]</i>	31
<i>Obr. 4. 1: Schéma zapojení úlohy</i>	37
<i>Obr. 4. 2: Rozměry laboratorního přípravku</i>	39
<i>Obr. 4. 3 – Graf závislosti stykového odporu na úhlu sklonu a proudu</i>	41
<i>Obr. 4. 4: Průběh oteplovací charakteristiky celého měření č. 3</i>	43
<i>Obr. 4. 5: Průběh oteplovací charakteristiky části měření č. 3 pod proudem</i>	44
<i>Obr. 4. 6: Přípravek během měření (foceno termokamerou)</i>	47
<i>Obr. 4. 7: Detail kontaktu během měření (foceno termokamerou)</i>	47
<i>Obr. 4. 8: Detail opotřebeného kontaktu (trubky) po experimentu</i>	47
<i>Obr. 5. 1: Přívodní vodič</i>	49
<i>Obr. 5. 2: Určování emisivity termokamerou</i>	51
<i>Obr. 5. 3: Náhradní tepelné schéma přívodního vodiče</i>	54
<i>Obr. 5. 4: Rozměry trubky</i>	54
<i>Obr. 5. 5: Náhradní tepelné schéma trubky</i>	57
<i>Obr. 5. 6: Náhradní tepelné schéma pro přívod</i>	59
<i>Obr. 5. 7: Náhradní tepelné schéma pro kontaktní styk</i>	60
<i>Obr. 5. 8: Rozměry šroubu a styčné plochy</i>	61
<i>Obr. 5. 9: Náhradní tepelné schéma pro šroubový styk</i>	62
<i>Obr. 5. 10: Celé náhradní tepelné schéma přípravku</i>	63
<i>Obr. 6. 1: Detail upraveného přípravku – kontakt</i>	65
<i>Obr. 6. 2 – Graf závislosti stykového odporu na úhlu sklonu a proudu po úpravě přípravku</i>	66
<i>Obr. 6. 3: Průběh oteplovací charakteristiky celého měření č. 1</i>	67
<i>Obr. 6. 4: Průběh oteplovací charakteristiky části měření č. 1 pod proudem</i>	68



<i>Obr. 6. 5: Upravený přípravek – celkový pohled</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 6. 6: Detail kontaktu krátce po spuštění experimentu pořízený termokamerou</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 6. 7: Šíření tepla přípravkem v průběhu experimentu (foceno termokamerou).....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 7. 1: Rozměry přívodního vodiče po provedené úpravě</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 7. 2: Náhradní tepelné schéma přívodního vodiče po úpravě rozměrů.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 7. 3: Rozměry trubky po úpravě přípravku</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 7. 4: Náhradní tepelné schéma trubky po úpravě rozměrů.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 7. 5: Celé náhradní tepelné schéma upraveného přípravku</i>	<i>76</i>
<i>Obr. P3. 1: Oteplovací charakteristika měření 1</i>	<i>83</i>
<i>Obr. P3. 2: Oteplovací charakteristika měření 2</i>	<i>83</i>
<i>Obr. P3. 3: Oteplovací charakteristika měření 3</i>	<i>84</i>
<i>Obr. P3. 4: Oteplovací charakteristika měření 4</i>	<i>84</i>
<i>Obr. P5. 1: Oteplovací charakteristika měření 1</i>	<i>86</i>
<i>Obr. P5. 2: Oteplovací charakteristika měření 2</i>	<i>86</i>
<i>Obr. P5. 3: Oteplovací charakteristika měření 3</i>	<i>87</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4. 1 – Závislost elektrodynamické síly na proudu přípravkem.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4. 2 – Minimální hodnoty stykových odporů pro vznik jevů.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4. 3. – Seznam použitých přístrojů</i>	<i>43</i>
<i>PŘÍLOHA 1 - Elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti kovových prvků</i>	<i>80</i>
<i>PŘÍLOHA 2 – Závislost sil a stykového odporu pro jeden kontakt.....</i>	<i>81</i>
<i>PŘÍLOHA 4 – Závislost sil a stykového odporu pro jeden kontakt po úpravě přípravku.....</i>	<i>85</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
I	Proud	[A]
U	Napětí	[V]
F	Síla	[N]
B	Magnetická indukce	[T]
l	Délka	[m]
r	Poloměr	[m]
d	Průměr	[m]
R	Elektrický odpor	[Ω]
A	Povrch	[m ²]
S	Průřez	[m ²]
V	Objem	[m ³]
t	Čas	[s]
T, δ	Teplota	[°C]
$\Delta\vartheta, \Delta\delta$	Oteplení	[K]
R_g	Tepelný odpor	[K·W ⁻¹]
ϕ	Tepelný tok	[W]
α	Úhel	[°]
P_z	Tepelný výkon	[W]
m	Hmotnost	[kg]
a	Šířka	[m]
h	Vzdálenost	[m]
ω	Úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
μ_0	Permeabilita vakua	[H·m ⁻¹]
μ_r	Permeabilita prostředí	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W·K ⁻¹ ·m ⁻¹]
E	Modul pružnosti materiálu v tahu	[Pa]
α_0	Součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
g	Tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
c	Objemová tepelná kapacita	[J·m ⁻³ ·K ⁻¹]
τ	Časová konstanta	[s]
ρ	Rezistivita	[Ω ·m]
σ	Proudová hustota	[A·m ⁻²]
σ_P	Mez pevnosti v tahu	[Pa]
w	Koeficient typu styku	[-]
k	Materiálová konstanta	[-]
ξ	Rameno valivého odporu	[m]



1 ÚVOD

Každý spínací přístroj musí být svou konstrukcí schopen zabezpečit základní statické stavy obvodu – zapnuto a vypnuto. Je však potřeba zajistit také přechodné stavy mezi těmito stavy – zapínání a vypínání. Spojení dvou částí obvodu se uvnitř přístroje realizuje stykem dvou kontaktů. Na tuto kontaktní dvojici jsou při návrhu přístroje kladeny náročné požadavky na elektrické, fyzikální a chemické vlastnosti kontaktního materiálu, úzce související s parametry obvodu a okolního prostředí. Je vhodné, aby daný materiál splňoval podmínky dobré elektrické a tepelné vodivosti, dobré mechanické, teplotní a oxidační odolnosti. Problém je, že neexistuje žádný ideální materiál, jenž by stoprocentně splňoval všechny předešlé požadavky. Proto je volba materiálu kontaktní dvojice vždy kompromisem.

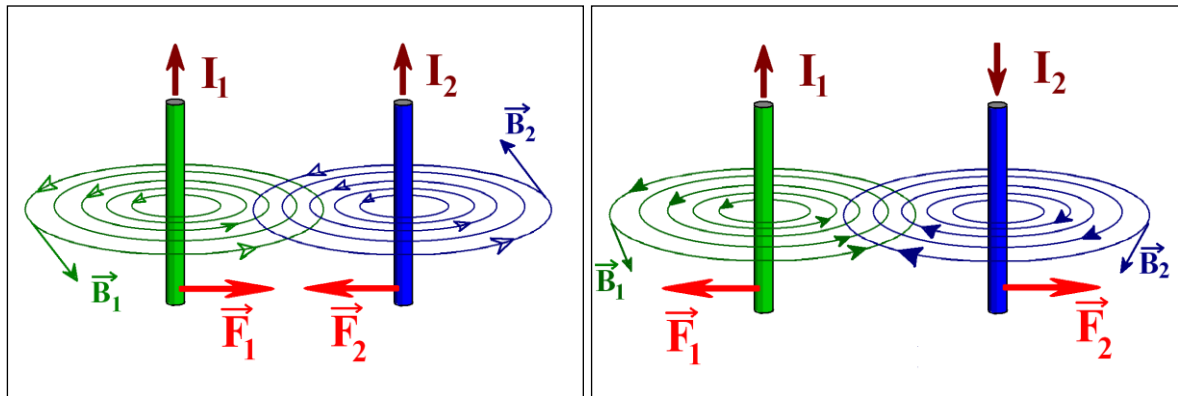
Významnou komplikací funkčnosti spínacího přístroje představují také samotné účinky elektrického proudu. Silové účinky elektrického pole protékaného proudu mohou negativně i pozitivně ovlivňovat přitlačné síly kontaktů. Tepelné účinky způsobují deformace styčných ploch kontaktního styku a v extrémních případech i jeho znehodnocení. Tepelným svařením kontaktů může dokonce dojít k trvalému spojení, natolik pevnému, že elektrický přístroj při požadavku vybavení selže.

Samostatnou kapitolu představují elektrické výboje, jejichž existence je jednou z největších překážek bezproblémové funkce přístrojů. Opotřebení a tepelnému namáhání způsobenému elektrickým proudem se však nejsme schopni v současném stavu vědy a techniky zatím vyhnout. Je ale možné vhodnou konstrukcí a volbou materiálu kontaktů tyto nežádané účinky elektrického proudu alespoň minimalizovat.

2 ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

2.1 Silové účinky elektrického proudu (elektrodynamické síly)

Vodič, kterým protéká elektrický proud, vytváří ve svém těsném okolí magnetické pole. Stejně tak na vodič protékaný elektrickým proudem působí v magnetickém poli síla. Tuto sílu, nazývanou elektrodynamická, můžeme dobře pozorovat například na dvou pohyblivých rovnoběžných vodičích, umístěných blízko sebe. Protéká-li oběma těmito vodiči elektrický proud stejným směrem, vodiče se vzájemně přitahují (obr. 2. 1a). Pokud však proud v jednom z těchto vodičů změni směr, začne na vodivou dvojici působit síla opačná a vodiče se budou navzájem odpuzovat (obr. 2. 1b).



Obr. 2. 1: Působení elektrodynamických sil na dvojici vodičů protékaných proudem
a) ve stejném směru, b) opačným směrem.

Matematicky můžeme elektrodynamickou sílu vyjádřit pomocí délkového elementu dl vodiče. Na element dl protékaného proudem i , nacházejícího se v magnetickém poli s indukcí B , působí síla

$$dF = i \cdot dl \times B \quad (1)$$

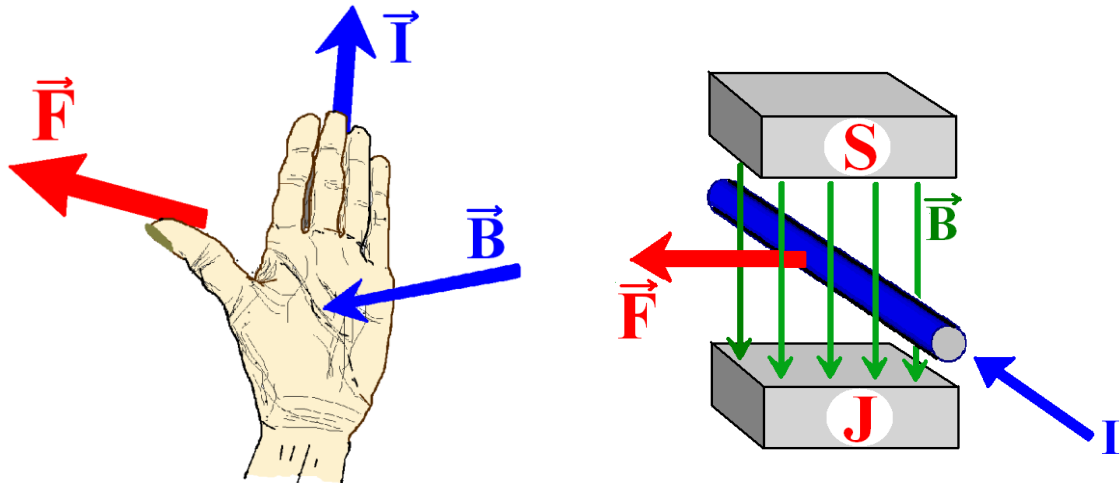
Na proudovou dráhu délky l potom působí síla

$$F = i \cdot \int_l dl \times B \quad (2)$$

Tento vztah popisuje tzv. Ampérův zákon pro sílu v magnetickém poli. Směr síly lze snadno odvodit pomocí Flemingova pravidla pravé ruky (obr. 2. 2). Velikost magnetické indukce, popisující silové účinky magnetického pole, určuje rovnice

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dl \times r}{r^3} \quad (3)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ je permeabilita vakua a r vzdálenost od vodiče.



Obr. 2. 2: Flemingovo pravidlo levé ruky

Velikost elektrodynamické síly tedy závisí na velikosti protékaného proudu, délce vodičů a vzdálenosti vodičů. Tato síla má mimo jiné na svědomí i mechanické namáhání samotného protékaného vodiče, které nabývá vysokých hodnot zejména při zkratech. Během zkratu totiž proudovou dráhou prochází zvlášť velký elektrický proud a výsledná elektrodynamická síla, jejíž vektor působí směrem do středu dráhy, může mít za následek až deformaci (změnu tvaru) vodiče.

Ke vzniku magnetických polí a s tím souvisejících elektrodynamických sil dochází mimo jiné případy také při deformaci proudového toku vlivem změny průřezu vodiče, což se týká i kontaktního styku. U čelních kontaktů s bodovým stykem se setkáváme s nežádoucí odpudivou silou F , která snižuje kontaktní přitlačnou sílu F_P a zvyšuje tak stykový odpor (obr. 2. 3). Uvažujeme přitom kruhovou stykovou plošku o průměru d , jejíž velikost u kontaktů z totožného materiálu určuje rovnice

$$d = 2,22 \cdot \sqrt{\frac{F_P \cdot R}{E}} \quad (4)$$

kde R je poloměr povrchu kontaktů a E modul pružnosti materiálu kontaktů v tahu.

Ve střídavém obvodu s harmonickým průběhem proudu $i = I_m \cdot \sin\omega t$ udává časový průběh síly F rovnice

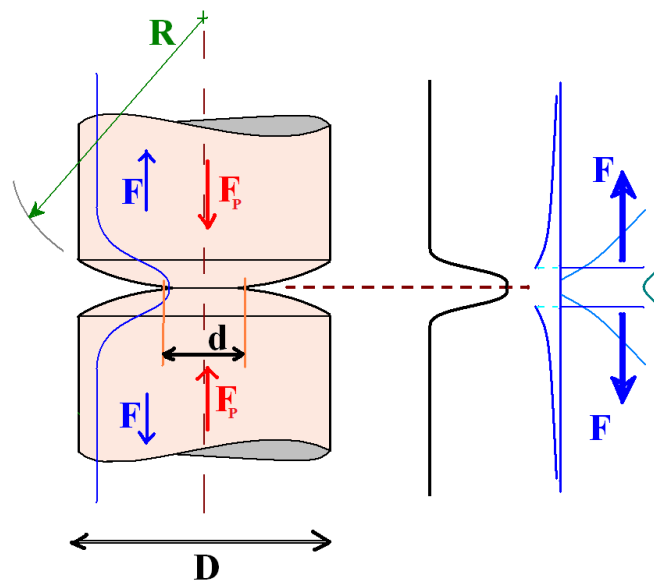
$$F = I^2(1 - \cos 2\omega t) \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \quad (5)$$

přičemž její maximální velikost nastává pro $\cos 2\omega t = -1$ a je rovna

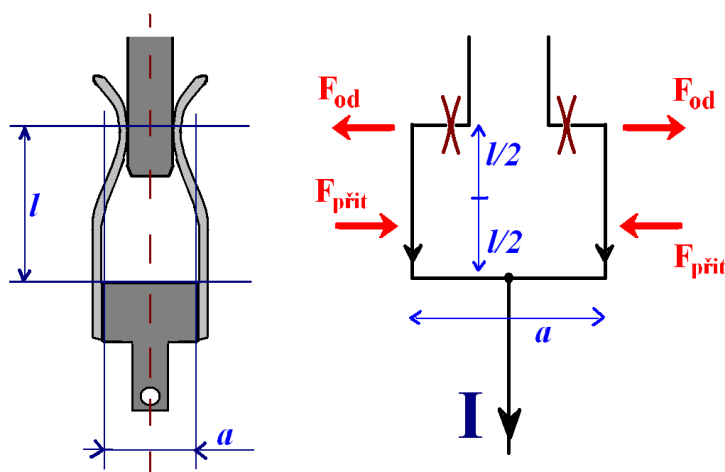
$$F_{max} = 2I^2 \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \quad (6)$$

kde D je průměr kruhového vodiče. Uvedený výraz nám ukazuje, že odpudivá síla roste s druhou mocninou proudu a maximální hodnoty dosahuje v maximu proudu, tedy v čase, kdy je kontaktní styk také nejvíce namáhán tepelně. Zvláště nepříznivě pak v takovém případě působí zkratový proud.

Nežádoucí vliv odpudivé síly lze částečně kompenzovat jiným konstrukčním uspořádáním kontaktu vytvořením kontaktního páru (obr. 2. 4). Mezi dvěma kontakty umístěnými proti sobě, protékajícími souhlasným proudem, vznikají síly vzájemně opačné, jež potlačují negativní účinky odpudivé síly. [1]



Obr. 2. 3: Odpudivá síla na čelním kontaktu.



Obr. 2. 4: Přitažlivé a odpudivé síly na kontaktním páru.

2.2 Tepelné účinky elektrického proudu

Pokud vodičem o odporu R protéká v časovém okamžiku dt elektrický proud I , dochází v něm k přeměně části energie na tepelné ztráty $dQ = RI^2dt$. Část tohoto tepla se odvede do okolí ochlazováním a zbytek v proudové dráze zůstává a zvyšuje její teplotu. V rovnici tepelného příkonu

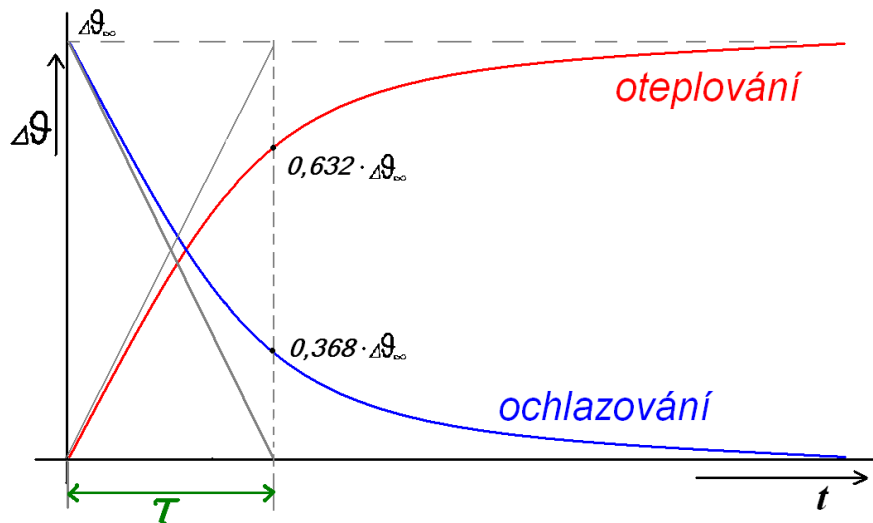
$$RI^2dt = \alpha_0 A \Delta \delta dt + cVd\delta \quad (7)$$

představuje první člen $\alpha_0 A \Delta \delta dt$ teplo odvedené do prostoru a druhý člen $cVd\delta$ teplo spotřebované v tělese. Číslo α_0 ($W / m^2 \cdot K$) označujeme jako součinitel (koeficient) přestupu tepla, A (m^2) je ochlazovaný povrch úseku vodiče, $\Delta \delta$ (K) je oteplení, tedy rozdíl okamžité teploty tělesa (vodiče) vůči svému okolí. $d\delta$ (K) ve druhém členu pak představuje zvýšení teploty vodiče, c ($J / m^3 \cdot K$) se nazývá objemová tepelná kapacita daného úseku vodiče o objemu V (m^3).

Průběh oteplovací, resp. ochlazovací charakteristiky je znázorněn na obr. 2. 5.

Křivka průběhu oteplení je ve tvaru exponenciály s počátkem v nule. Po strmém startu na počátku děje se křivka stále pomaleji blíží k hodnotě maximálního oteplení $\Delta \delta_\infty$ (K), kde by se ustálila v čase $t \rightarrow$ nekonečno. V takovém případě se již veškeré vyrobené teplo předává do okolí. Z obr. 2. 5 lze také dobře vyčíst časovou konstantu τ (s), definovanou jako dobu, za kterou by těleso dosáhlo ustáleného oteplení, kdyby se z jeho povrchu neodvádělo žádné teplo (tzn. pokud by $\alpha_0 = 0$). Časová konstanta je určena tečnou vedenou počátkem oteplovací křivky a je rovna hodnotě

$$\tau = 0,632 \cdot \Delta \delta_\infty \quad (8)$$



Obr. 2. 5: Oteplovací a ochlazovací charakteristika

Velikost maximálního oteplení povrchu vodiče $\Delta\delta_{\infty}$ je shora limitována především tepelnou odolností užitých izolantů, jež se dovolené trvalé teploty dělí do sedmi tepelných tříd Y, A, E, B, F, H a C. Obvod však může být dimenzován pro menší jmenovitý proud v případě přerušovaného (pulzního) chodu, kdy je zajištěno střídání zátěžového a klidového stavu. Průběh charakteristiky pak nikdy nedosáhne ustáleného oteplení jako v případě trvalého zatížení a lze proto použít menších a tudíž levnějších zařízení.

Z hlediska kontaktů je však pro nás nejdůležitější účinek krátkodobého oteplení, například při zkratu. Prochází-li proudovou dráhou proud po dobu kratší než cca 0,2násobku časové konstanty τ , lze zanedbat složku odvedeného tepla do prostoru ($\alpha_0 = 0$) a tvrdit tak, že veškeré teplo se akumulovalo v tělese a výrazně tak zvýšilo jeho teplotu. Ze zjednodušené rovnice tepelného příkonu

$$RI^2 dt = cVd\delta \quad (8)$$

můžeme integrací za podmínek $t = 0, d\delta = 0$, vyjádřit dobu krátkodobého oteplení $d\delta = \Delta\delta_{kd}$ za dobu $dt = t_{kd}$

$$\Delta\delta_{kd} = \frac{RI^2}{cV} t_{kd} \quad (9)$$

což lze dále upravit do tvaru

$$\Delta\delta_{kd} = \frac{\rho \cdot l \cdot I^2}{c \cdot l \cdot S^2} t_{kd} = \frac{\rho}{c} \left(\frac{l}{S}\right)^2 t_{kd} = \frac{\rho\sigma^2}{c} t_{kd} \quad (10)$$

kde S (m^2) je průřez vodiče délky l (m), ρ ($\Omega \cdot m$) jeho rezistivita a σ (A / m^2) proudová hustota. Nejméně příznivý okamžik zkratu nastává po dlouhodobém průchodu jmenovitého



proudu, tedy v době, kdy je již teplota proudové dráhy velmi blízko maximálnímu oteplení. Výsledná teplota úseku je pak dána součtem teploty okolí δ_o , oteplení jmenovitým proudem $\Delta\delta_\infty$ a krátkodobého oteplení $\Delta\delta_{kd}$:

$$\delta_{kd} = \delta_o + \Delta\delta_\infty + \Delta\delta_{kd} \quad (11)$$

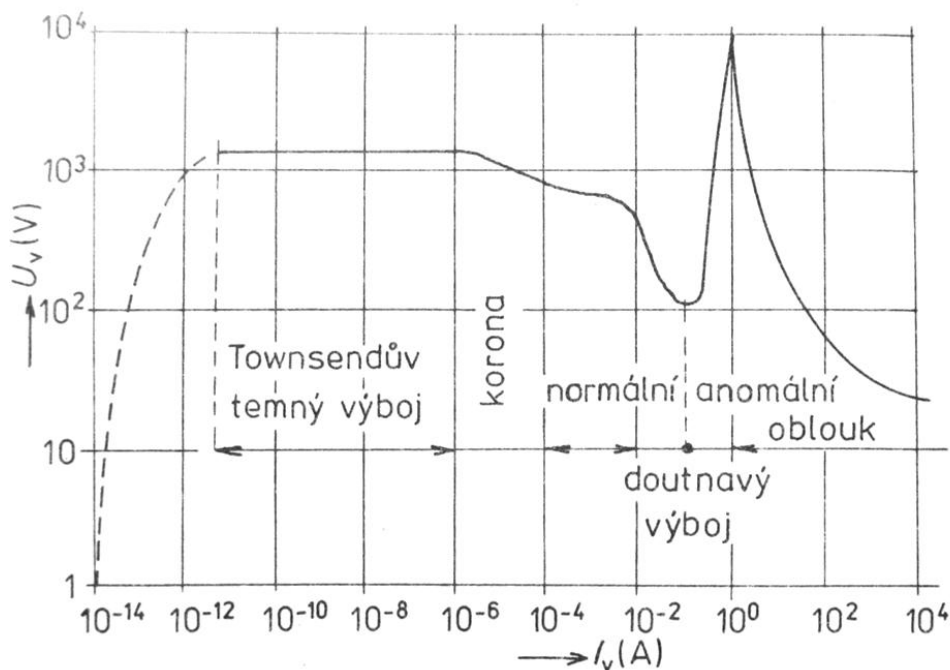
Z rovnice (10) je zřejmé, že k největšímu oteplení dochází v místě nejmenšího průřezu, tj. v místě s největší proudovou hustotou. Z tohoto důvodu je tedy nutno věnovat zvýšenou pozornost zejména kontaktnímu styku, neboť během bezporuchového provozu přístrojů jsou kontaktní dvojice nejvíce namáhanými body obvodu a jejich selhání například v důsledku měknutí materiálů a následného svaření může mít až tragické následky. Teplota δ_{kd} proto nikdy nesmí překročit velikost, při které by došlo ke zmenšení mechanické pevnosti materiálu vodiče (kontaktů), případně při které by byly narušeny izolanty. [1]

2.3 Elektrické výboje

Izolant může za určitých okolností vlivem tepelných dějů, které v něm probíhají, vést elektrický proud. Tento fyzikální jev je obecně nazýván jako elektrický výboj. Obvykle se jedná o krátkodobý děj, během kterého prostředí přejde z nevodivého stavu do vodivého. Aby se tak stalo, je nutné v tomto prostředí vytvořit či do něj dodat elektricky nabitě částice, tedy volné elektrony a ionty. Dále je pro vznik výboje mezi dvěma elektrodami nezbytné, aby na elektrodách bylo napětí. Pro vzniklý výboj jsou určující elektrody a prostor mezi nimi. V něm se utváří sloupec výboje tvořený plazmou. Důležitými parametry určující vlastnosti výboje jsou napětí na elektrodové dvojici, procházející proud, tlak v prostoru výbojové dráhy, chemické složení plazmatu a tvar a materiál elektrod. Výboj dále ovlivňují další pochody v okolí, jako je například způsob chlazení. Dle velikosti proudu a napětí se výboje dělí na několik druhů:

- Temný výboj,
- Koronový výboj,
- Doutnavý výboj,
- Jiskrový výboj,
- Obloukový výboj.

Každému druhu výboje odpovídá určitý rozsah napětí a proudů. Tuto závislost napětí mezi elektrodami na proudu nazýváme *charakteristikou výbojů* (obr. 2. 6). [1]



Obr. 2. 6: Charakteristika výbojů [1]

Pro nás je z hlediska kontaktů nejzajímavější výboj obloukový, potažmo jiskrový. K jiskrovému výboji dochází v silném elektrickém poli a je tvořen krátkodobou jasně svítící jiskrou. Je to elektrický přeskok mezi póly s vysokým rozdílem potenciálu. Pokud nejsou v prostoru výboje nastoleny podmínky pro přechod jiskry v elektrický oblouk, jev samočinně zanikne bez pomoci zhašecího zařízení. Jiskrového výboje se využívá například v benzínových (zážehových) motorech, kde jiskrový výboj mezi kontakty zapalovací svíčky zažehne připravenou směs paliva se vzduchem. V přírodě se pak nejvýrazněji vyskytují ve formě atmosférických výbojů, neboli blesků. [6]

Obloukový výboj je však z hlediska vzniku i zániku mnohem komplikovanější. Na rozdíl od jiskry dokáže samostatně existovat po teoreticky libovolnou dobu, dokud není přerušeno nějakým vnějším vlivem. Pro jeho vytvoření není mezi póly potřeba vysoké napětí (stačí i desítky voltů), pro ionizaci vzduchu však musí být prostor silně zahřátý. K tomu dochází například při vzájemném dotyku dvou elektrod, kdy dojde ke zkratu a průchodu velkého proudu. Díky němu se špičky elektrod rozžhaví na teplotu až 5000°C a vzduch v okolí rychle ionizuje. Po oddálení hrotů elektrod pak ionizovaný prostor dál vede elektrický proud a je schopen se ionizačními pochody udržovat stále vodivý. Oblouk je charakteristický vysokou teplotou a proudovou hustotou katodové skvrny, velkým procházejícím proudem a relativně malými úbytky napětí mezi elektrodami. Doprovázen je intenzivním vyzařováním bílého světla z plazmatu. Jeho vznik je velmi rychlý, obvykle v řádech mikrosekund. Může existovat ve stejnosměrných i střídavých obvodech. Uprostřed výbojové dráhy oblouku se nachází jádro. Vlivem chlazení a elektrodynamických sil je v jádře kruhovitěho průřezu nejvyšší teplota, pohybující se kolem $10\,000^\circ\text{C}$. Kolem jádra je chladnější obal, v němž dochází k rekombinačním (deionizačním) procesům. Pokud rekombinační pochody převládají nad ionizačními, oblouk



zaniká. Toho lze cíleně dosáhnout změnou parametrů obvodu (napětí, proud, odpor...), snížením tlaku prostředí (snižuje se tak vodivost plynu), změnou chemických vlastností prostředí, prodloužením délky oblouku, nebo jeho nuceným či přirozeným chlazením.

V praxi oblouk využíváme například při svařování. Svařovaná část je kabelem připojena k jednomu pólu zdroje a svařovací elektroda ke druhému. Krátkým dotykem elektrody a kovové plochy se mezi nimi zapálí oblouk a jeho žářem se svařovací elektroda i materiál taví. Vzniklá tavenina svařované části pevně spojí.

Obloukový výboj má na kontaktní dvojici (například vypínač) špatný vliv. Svými účinky může oblouk kontakt nevratně poškodit nebo zcela zničit. Během spínacího děje přístroje se mezi přibližujícími se póly zvyšuje intenzita elektrického pole a snižuje se tak elektrická pevnost prostředí. V určitém okamžiku dojde k elektrickému průrazu, ionizaci prostředí mezi kontakty a vznikne elektrický oblouk. K jeho zážehu dojde těsně před dotykem kontaktů, kdy zanikne. Většinou tak nestihne mít žádný vliv na zapínací pochod ani samotný kontakt. Výrazněji se projeví v případě vzájemného pružného odražení kontaktů a opětovného vzniku vzduchové mezery. Během jejich kmitavého pohybu působí mezi nimi elektrický oblouk, jehož příčinou se plochy kontaktů výrazně zahřívají. Dochází tak k měknutí a deformaci styčných ploch, v případě spínání vysokých proudů může být důsledkem dokonce až trvalé svaření kontaktů. Následkem může být poškození celého zařízení nebo obvodu. Je proto žádoucí, aby zapínací proces probíhal co nejrychleji a aby přítlačná síla kontaktů byla dostačující.

Mnohem problematičtější je v tomto ohledu vypínání silnoprůdového obvodu. Na rozdíl od spínacího děje zde totiž elektrický oblouk existuje již od samého začátku, tedy od okamžiku oddělení kontaktů. Delší působení oblouku způsobí více uvolněného tepla a představuje tak mnohem větší tepelné namáhání vypínače. V místě paty oblouku dochází k tavení a odpařování kontaktů. Míra opotřebení kontaktů je přitom opět závislá na době trvání oblouku a velikosti proudu. Nutno však zmínit, že kromě těchto nežádoucích vlivů na přístroj je přítomnost oblouku pro obvod v určitých ohledech naopak přínosem. Vzniklé teplo totiž vzniká přeměnou části elektromagnetické energie akumulované v obvodu, jenž by se jinak při vypínání projevila napěťovou špičkou.

Pro minimalizaci doby hoření elektrického oblouku mezi elektrodami během vypínacího děje je třeba efektivně podpořit deionizaci prostředí výbojové dráhy. Jedním z možných způsobů je umělé prodloužení dráhy oblouku pomocí rychlé výměny ionizovaného plynu (např. fouknutím), nebo pomocí magnetického pole. Prodloužením oblouku se zvětší ochlazovací plocha, zmenší se průměr plazmatu a tím se sníží vodivost a zvětší odpor. S rostoucím odporem roste i uvolněné Joulovo teplo do okolí. Celý proces ochlazování probíhá až do úplného zániku výboje. Při tomto principu využíváme *radiální difúze částic*. Pro urychlení difúzních (rekombinačních) pochodů v oblouku a účinnější odvod tepla slouží zhášedla. Zatímco zhášedla s vlastní energií používají pro vzájemný pohyb zhášeného výboje a okolního plynu magnetické pole tvořené vypínaným proudem, zhášedla s cizí energií pro tento pohyb využívají předpřipravené energie ve formě střadače či stlačeného plynu. V praxi se ve vypínacích využívá zhášecí komora se žebry či šterbinová komora. Zužitkovány často bývají například také výhody vakua, ve střídavých obvodech se zase využívá průchodu proudu nulou. [1]



3 KONTAKTNÍ DVOJICE

3.1 Požadavky na kontakty

Obecně lze elektrický kontakt definovat jako mechanický prvek, jenž dotykem dvou elektricky vodivých ploch umožňuje vést elektrický proud. Kontaktní dvojice je velmi namáhaná část obvodu a svým úkolem se řadí mezi nejdůležitější konstrukční součásti zařízení. Jejich funkcí je spínání a rozpojování elektrických obvodů, případně i jejich propojování. Pro svou důležitost jsou na ně kladeny vysoké nároky; především se jedná o provozní spolehlivost a co nejdelší životnost. Z hlediska jmenovitých hodnot elektrických parametrů, umístění i významu přístroje jsou na kontakty vznášeny i další konkrétní požadavky na jejich fyzikální, elektrické, chemické a technologické vlastnosti. V praxi má neméně důležitý vliv také otázka ekonomická (cena, dostupnost, atd.).

Funkce kontaktů tedy závisí na následujících parametrech:

- Elektrické parametry: napětí, proud, frekvence, druh zátěže, atd.
- Mechanické parametry: velikost a tvar plochy kontaktů, přítlačný tlak, rychlost spínání a rozpínání, jejich četnost, apod.
- Materiál: vodivost, tvrdost, teplota měknutí a tání a další fyzikální a chemické vlastnosti.
- Okolní prostředí: teplota, prašnost, vlhkost, chemické složení obklopujícího plynu, otřesy, atd.

Přerušování obvodu může probíhat za různých stavů, ve všech případech však na kontaktní dvojici klademe tyto požadavky:

- co nejmenší přechodový odpor,
- velká mechanická odolnost proti otěru,
- velká odolnost proti působení elektrických výbojů (opalování, sváření),
- chemická stálost materiálu (koroze, reaktivita). [1, 2]

3.2 Stykový odpor kontaktů

Sepnutý kontakt představuje styk dvou vzájemně přítlačovaných kovových materiálů. Místo styku ale ve skutečnosti není představováno celou přítlačnou plochou, nýbrž jen náhodným počtem bodů, tedy miniaturních plošek. Tento nevídaný jev je dán mikroskopickou nerovností povrchu kontaktních ploch, neboť je technicky nemožné vyrobit a udržovat zcela rovinný a detailně přesný povrch. Přestože nikdy není znám přesný počet těchto dotykových plošek, lze z geometrické definice roviny usuzovat, že tato místa budou vždy nejméně tři. Jejich počet i velikost jsou pak odvozeny od přítlačné síly kontaktů a od mechanických vlastností materiálu. Kontaktní spoj tedy pro proudovou dráhu představuje zúžené místo neboli zmenšený průřez. Ten

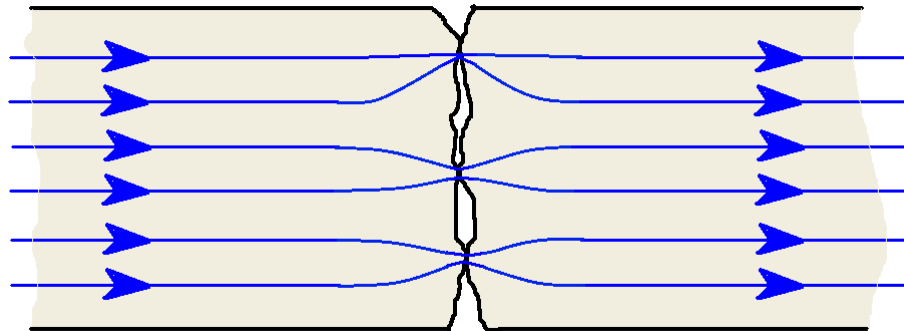
způsobuje deformaci, prodloužení a zhuštění proudnic, čímž se zvětšuje *odpor úžiny* (místa styku).

Svou roli hrají také cizí vrstvy na povrchu kontaktů, neboť i ty jsou příčinou zvětšení odporu. Na kontaktu se mohou vytvořit chemickou cestou (reakcí), nebo mohou být přeneseny z jiného zdroje (nečistoty, prach, mastnota apod.). Jejich přítomností vzniká mezi kontakty tzv. *přechodový odpor cizích vrstev*.

Stykový odpor kontaktů R_S vypočítáme jako součet obou složek:

$$R_S = R_U + R_P \quad (12)$$

kde R_U je úžinový odpor a R_P přechodový odpor cizích vrstev. [1, 3]



Obr. 3. 1: Mikroskopická podoba místa styku.

3.2.1 Úžinový odpor kontaktů

Úžinový odpor popisuje odpor ideálně čistých kontaktů v místě jejich styku a jeho těsném okolí. Jeho velikost souvisí především s velikostí styčné plochy, je však závislá také na měrném odporu materiálu kontaktů a jeho mechanických vlastnostech, na teplotě dle teplotního koeficientu odporu a na frekvenci protékajícího proudu. Velikost stykových plošek dále ovlivňuje přítláčná síla F_p , tvar a užitý materiál (nebo jejich kombinace). Podle geometrického uspořádání dělíme styk kontaktů na:

- bodový,
- přímkový,
- plošný.

Bodový styk nastává při dotyku dvou kulových ploch či koule s rovinnou plochou. Přímkový styk může vytvořit válcový (resp. kuželový) tvar při styku s rovinnou a plošný styk teoreticky vznikne přiblížením dvou rovnoběžných rovin. U všech tvarů kontaktů však záleží na pevnosti materiálu, podle níž rozlišujeme stykové plochy

- s pružnou deformací,
- s trvalou deformací.



Pro numerické určení úžinového odporu zvažujeme předpoklady, že styk rovinných kontaktů je kruhového tvaru s poloměrem r a že proudové pole vytvořené v materiálu v těsné blízkosti dotyku se ve skutečnosti blíží eliptickému tvaru. Potom celkový odpor proudové úžiny počítáme jako

$$R_U = \frac{\rho}{2r_0} \quad (13)$$

kde ρ je rezistivita materiálu. Pro poloprostor (jeden kontakt) bude hodnota odporu poloviční, ovšem jenom v případě, kdy budou obě části kontaktní dvojice ze stejného materiálu. Jsou-li kontakty různé, počítáme odpor jako

$$R_U = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4r_0} \quad (14)$$

Pokud předpokládáme, že je dotyk tvořen n ploškami stejného průřezu, vypočítáme celkový odpor jako součet dílčích úžinových odporů R_{Un} , kde

$$R_{Un} = \frac{\rho}{2nr_0} \quad (15)$$

Poloměr r kruhové plošky je závislý především na přitlačné síle F_P a modulu pružnosti materiálu E . Pro pružnou deformaci a dva kulové povrchy o poloměru r_P na sebe doléhajících kontaktů je poloměr plošky dán vztahem

$$r_0 = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_P \cdot r_P}{E}} \quad (16)$$

Pro kulový kontakt proti rovinnému bude poloměr r o něco větší, tedy

$$r_0 = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_P \cdot r_P}{E}} \quad (17)$$

Pokud uvažujeme rozdělení styku na n stejných plošek, bude tak rozdělena i přitlačná síla. Při výpočtu poloměru dílčí plošky pak přitlačnou sílu F_P vždy dělíme n .

Vzniklé rovnice pak budou tvaru

$$r_0 = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_P \cdot r_P}{nE}} \quad (18)$$

pro dvě kulové plochy a

$$r_0 = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_P \cdot r_P}{nE}} \quad (19)$$

pro dotyk kulového a rovinného kontaktu. Poloměr stykové plošky po překročení pružné deformace materiálu vyjadřuje vztah

$$r_0 = \sqrt{\frac{F_P}{\pi \cdot \sigma_p}} \quad (20)$$

kde σ_p zastupuje mez pevnosti v tlaku materiálu. [1] Mez pevnosti je nejvyšší hodnota normálového napětí (síly), po jejímž překročení dojde k narušení soudružnosti materiálu a tím k trvalé deformaci tvaru. [7]

Protože vypočítaná závislost stykového odporu na přítlačné síle se vždy liší od zjištěné závislosti měřením, je třeba brát uvedené výpočty s rezervou. Problematiku výpočtů navyšuje fakt, že v proudové úžině není nikdy v celém průřezu konstantní teplota. Komplikaci představují i cizí vrstvy na povrchu kontaktů, jimiž se budeme zabývat v následující kapitole. [1]

3.2.2 Přejídnový odpor cizích vrstev

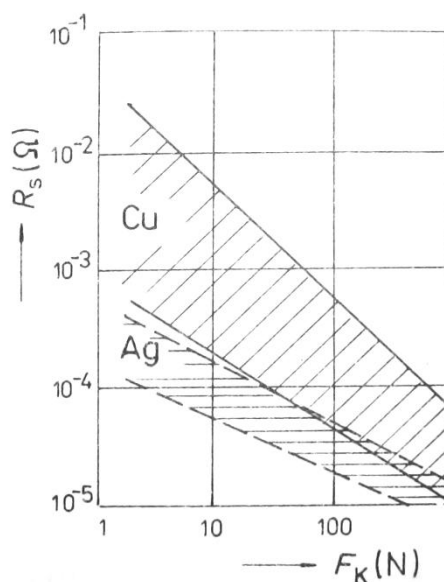
Kromě odporu proudové úžiny zvyšují velikost stykového odporu také vrstvy cizích látek, vznikající na povrchu kovů. Mohou být vytvořeny chemickou, nebo mechanickou cestou. Vlivem působení látek obsažených v okolí a určitého tlaku dochází k reakci prostředí s materiálem, jejímž výsledkem je vytvoření tenké vrstvy, a to ve velmi krátké době. Problémem je, že skoro vždy jsou elektrické vlastnosti vzniklých parazitních vrstev mnohem horší než vlastnosti čistého materiálu, což se projevuje právě zvětšením stykového odporu. Dosáhnout čistého povrchu kovů je bohužel možné jen za speciálních podmínek ve vysokém vakuu. Přejídnový odpor však můžeme výrazně omezit vhodnou volbou materiálu pro výrobu kontaktů, neboť je známo, že stykový odpor narůstá se zvětšující se tloušťkou cizí vrstvy a se snižující se přítlačnou silou F_P . U tenkých vrstev přejídnový odpor v podstatě nezávisí na teplotě a frekvenci proudu. Pokud je ale vrstva silnější, může být velikost odporu cizích vrstev až o dva řády vyšší

než úžinový odpor. Takový odpor již může přechod proudu mezi kontakty zcela znemožnit a je možný až po mechanickém očištění ploch, případně po elektrickém průrazu vrstvy.

Mezi mechanicky tvořené vrstvy patří zejména tuky. Reakcí tuku s kovem se na povrchu vytvoří monomolekulární vrstva, nazývaná *epilamen*. Přestože jde o izolant, je přes vrstvu možný průchod proudu pomocí tunelového jevu. S časem se na povrchu tvoří nové a nové tukové vrstvičky, jenž na sebe vážou mechanické částičky rozmanitých látek, nacházejících se v prostředí. Tyto částičky zpevňují tukovou vrstvu a výrazně ovlivňují stykový odpor. Pro jeho opětovné snížení je třeba vrstvu mechanicky odstranit, což lze mimo jiné zajistit zvětšením přítlaku.

Chemické vrstvy na povrchu vznikají interakcí čistého kovu s okolním plynem (např. kyslíkem). V krátkém časovém okamžiku vytvoří monomolekulární vrstvu, jejíž tloušťka případně může (dle materiálu) dále růst. Na vzduchu nejčastěji vznikají vrstvy oxidů, sulfidů a chloridů. Obvykle chemické vrstvy se svou tloušťkou v řádu desítek nanometrů dosahují rezistivity až $10^3 \Omega \cdot m$, obvyklé pro polovodiče a izolanty. [1, 2]

Narušení či úplné odstranění cizích vrstev může probíhat dvojím způsobem. Prvním z nich je mechanické rozrušení nežádoucích vrstev, za které je zodpovědný přítlak kontaktů. Závislost stykového odporu na přítlačné síle se liší dle použitých materiálů a je znázorněna na obr. 3. 2. Velmi pomáhá vzájemný třecí pohyb kontaktů, čímž dochází k manuálnímu přesunu nánosů a styku čistých povrchů. Druhý způsob je elektrické rozrušení vrstev. Zvyšováním napětí na zanesených kontaktech se mezi nimi nejprve prudce zvyšuje přechodový odpor, jenž následně začne klesat. Při určité hodnotě napětí dojde k elektrickému průrazu vrstvy a tím ke skokovému zmenšení odporu.



Obr. 3. 2: Závislost stykového odporu na přítlaku kontaktů. [1]

Stykový odpor se časem mění i při trvale sepnuté kontaktní dvojici, neboť v místě styku narůstají cizí vrstvy. V těchto případech je však možné registrovat samočisticí schopnost spoje.

S rostoucí vrstvou se totiž zvětšuje stykový odpor, zvětšuje se úbytek napětí a tím je dotyk zahříván. Při teplotě měknutí materiálu se zvětší deformace styku, jejímž důsledkem se styčná plocha kovů zvětší. Tento proces se s rostoucí teplotou opakuje a ve výsledku se projeví jako skokové snížení hodnoty odporu. [1]

3.3 Odolnost kontaktů, vypínací schopnost

3.3.1 Mechanická odolnost

Mechanická odolnost kontaktů je důležitá vlastnost materiálů především během zapínacího procesu. Při zapínání resp. vypínání dochází vlivem přitlačné síly a vzájemnému pohybu kontaktů k deformaci jejich povrchu a úbytku materiálu. Nejšetrnější případ nastává při jednoduché pružné deformaci, kdy je mechanické opotřebení povrchu jen minimální. I po překročení pevnosti materiálu dojde pouze k trvalé deformaci styku, úbytek materiálu je nulový. Opačná situace nastává při posouvání kontaktů, neboť během pohybu se o sebe dvojice otírá a dochází tak k úbytku objemu. Otěr je závislý na materiálu a jeho tvrdosti, přitlační síle a také na délce posuvu. Z důvodu zlepšení mechanických vlastností pro zvýšení doby života kontaktů jsou základní kontaktní materiály míchány s dalšími složkami.

- *Disperzně zpevněné materiály* – čisté základní látky jsou zpevňovány příměsí drobných částecek mechanicky pevných materiálů (např. wolframu).
- *Vnitřní oxidace* – kyslík je vháněn do taveniny a vytváří oxidy, jež jsou obvykle tvrdší než čistá látka.

Takto zpevněné materiály se vyznačují lepší mechanickou odolností, což souvisí i s větší odolností proti působení elektrického oblouku. Jejich nevýhodou je vyšší rezistivita, čímž se zvětšuje stykový odpor.

Vliv na mechanický otěr mají i cizí vrstvy na povrchu kontaktů. Oxidové vrstvy samy o sobě fungují stejně jako vnitřně oxidované sloučeniny, neboť jsou tvrdší a způsobují tak menší úbytek materiálu. Příliš velká tvrdost se ale negativně projevuje při zapínání, neboť se více odráží než kontakty měkké. Opakovaně se mezi nimi totiž vytváří oblouk, jenž hoří déle a napáchá větší škody na materiálovém úbytku. Oproti tomu tukové vrstvy na povrchu opakovaně odskoky potlačují, příznivě tedy zkracují dobu existence elektrického výboje mezi plochami, a zároveň snižují součinitel tření a tím zmenšují otěr. [1, 2]

3.3.2 Odolnost proti svaření

Jak již bylo naznačeno v kapitole 2.3, vzniká protékáním proudu přes kontaktní styk teplo. To způsobuje celkové oteplení kontaktní dvojice, které však není, vzhledem k nerovnoměrnému rozložení rezistivity proudovodné dráhy, ve všech místech konstantní. S rostoucí teplotou se však negativně mění vlastnosti kontaktních materiálů. Zvětšuje se totiž odpor styku a tím se zrychluje růst teploty. Dosáhne-li styčná ploška teploty měknutí materiálu, horký kov změkne a vlivem přitlačné síly dojde k okamžitému zvětšení dotykové plochy.



Kontaktní styk se tak stane kvalitnějším, procházející proud se může do zvětšeného průřezu lépe rozložit a proudová hustota se tím zmenší. Následkem popsané změny je prudké snížení styčného odporu a s tím souvisejícího vzniku tepla.

Pokud průřez dotyku stále nestačí pro protékanou elektrickou energii, dochází k dalšímu zvyšování teploty. Nad teplotní hranicí, označovanou jako teplota tání materiálu, nastává změna struktury styku, neboť roztavený kontaktní spoj se chová jako tekutina. Dojde de-facto ke slití obou částí, jež se po vychlazení (vlivem souvisejícího snížení stykového odporu) a ztuhnutí chová jako jeden celek. Už se jedná o kontakty navzájem svařené. Důsledkem tohoto jevu může být vážné poškození či zničení přístroje nebo i celého obvodu, neboť síla sváru může být větší, než je síla zajišťující odtažení kontaktů.

Výpočet oteplení styčného místa provádíme za zjednodušujícího předpokladu souměrné proudovodné úžiny s konstantními fyzikálními parametry, včetně totožnosti proudového a tepelného pole v úžině. Potom pro tepelný odpor R_{θ} a elektrický odpor R téhož prostoru platí rovnice:

$$\frac{R_{\theta}}{R} = \frac{\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S}}{\rho \cdot \frac{l}{S}} \quad (21)$$

kde λ značí součinitel tepelné vodivosti, S je průřez a l délka proudovodné dráhy a ρ je rezistivita materiálu kontaktů. Po matematické úpravě lze psát

$$R_{\theta} = \frac{R}{\lambda \cdot \rho} \quad (22)$$

v diferenciálním tvaru:

$$dR_{\theta} = \frac{1}{\lambda \cdot \rho} dR = \frac{1}{\lambda \cdot \rho} \frac{du}{i} \quad (23)$$

Předpokládáme-li ekvipotenciální polokulovou plochu A_P dostatečně vzdálenou od styčné plochy A_S , bude elektrické napětí mezi nimi rovno polovině velikosti úbytku napětí na kontaktní dvojici U_S (stykového napětí). Oteplení místa styku $\Delta\theta$ je současně vyjádřeno rozdílem teplot obou zmiňovaných ploch:

$$\Delta A = A_S - A_P \approx \frac{U_S}{2} \quad (24)$$

$$\Delta\theta = \theta_S - \theta_P \quad (25)$$



Pokud předpokládáme, že je vznikající teplo odváděno pouze kontaktem, lze tepelný spád $d\vartheta$ na dílčím odporu dR_ϑ v bodě x považovat za úměrný ztrátám, tj. tepelnému toku Φ , a odporu samotnému.

$$d\vartheta_x = \Phi_x \cdot dR_\vartheta \quad (26)$$

Přítom tepelný tok lze vyjádřit jako

$$\Phi_x = u_x \cdot i \quad (27)$$

a tepelný spád přejde do tvaru:

$$d\vartheta_x = \frac{u_x i}{\lambda \rho i} \cdot du_x = \frac{u_x}{\lambda \rho} \cdot du_x \quad (28)$$

Oteplení styku ku libovolné hladině proudové úžiny x s napět'ovým úbytkem U_x definuje vztah

$$\int_{\vartheta_x}^{\vartheta_s} d\vartheta_x = \frac{1}{\lambda \rho} \cdot \int_0^{\vartheta_x} u_x du_x = \frac{U_x^2}{2\lambda \rho} \quad (29)$$

jenž pro ekvipotenciální plochu A_P (viz rovnice 24) umístěnou tam, kde již nedochází k oteplení vlivem ztrát v úžině, získá tvar:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_s - \vartheta_P = \frac{U_s^2}{8\lambda \rho} \quad (30)$$

ϑ_P z předchozího vztahu (30) je teplota povrchu úžinou neovlivněné plochy A_P a její velikost vychází z rovnice

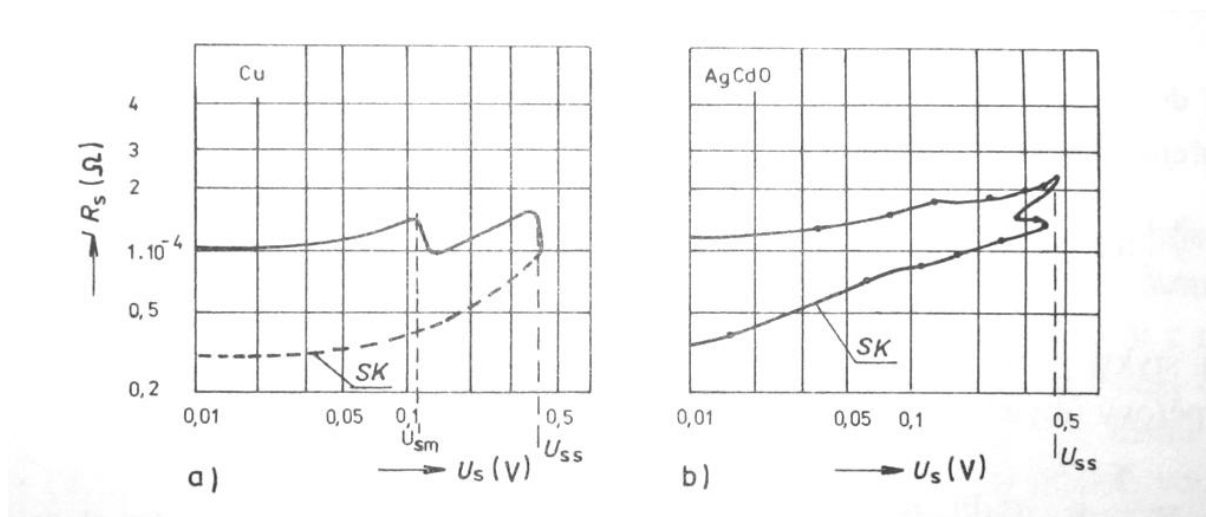
$$\vartheta_P - \vartheta_0 = \frac{RI^2}{\alpha_0 A_K} \quad (31)$$

kde I je velikost protékajícího proudu, A_K chladící povrch, α_0 součinitel přestupu tepla a ϑ_0 teplota okolí. Výsledkem odvození je žádaný vztah pro teplotu místa styku

$$\vartheta_s = \frac{U_s^2}{8\lambda \rho} + \frac{RI^2}{\alpha_0 A_K} + \vartheta_0 \quad (32)$$

z něhož je patrná přímá závislost oteplení styku na napět'ovém úbytku U_s . Závislost stykového odporu R_s lze proto výhodně vyjádřit jako funkci U_s , čehož se využívá v grafech popisujících tuto závislost pro různé materiály – v tzv. R/U diagramech.

Na základě úvahy předchozího odstavce lze jako velikost napětí vyjádřit i teplotu měknutí a tání materiálu. K měknutí dochází vždy při *napětí měknutí* U_{sm} , k tání a změně struktury styku pak po dosažení hodnoty *napětí svaření elektrického kontaktu* U_{ss} . Svaření kontaktů se na R/U diagramech projeví vykreslením druhé (hladší) křivky, která se vždy z důvodu nižšího odporu nachází v prostoru pod první křivkou.



Obr. 3. 3: R/U diagramy: a) pro měď, b) pro slitinu Ag-CdO. [1]

Ke svaření styčných ploch může dojít dvěma způsoby – ve statickém a v dynamickém režimu kontaktů:

Ve statickém (sepnutém) režimu kontaktní dvojice vzniká svár působením velkého proudu. Minimální velikost tohoto proudu je především dána vlastnostmi materiálu a povrchových vrstev, velikostí přitlačné síly a velikostí stykového odporu. Vzniklý svár se liší podle síly potřebné na jeho roztržení a podle procesu vzniku:

- “Studený“ svár – vznikl při napětí měknutí U_{sm} .
- Svár vytvořený tavením materiálu při napětí U_{ss} .
- Svár vzniklý za extrémních podmínek, při nichž uvolňované páry s elektrodynamickými silami oddalovaly rozteklé kontakty za vzniku elektrického oblouku.

Pro oddělení posledního jmenovaného sváru je třeba nejmenší síly, neboť procesy probíhající během vzniku vedou ke zmenšení pevnosti spojení. Naopak největší oddělovací sílu vyžaduje studený svár. Byly-li pro výrobu kontaktů použity vícesložkové materiály, ovlivňuje pevnost sváru každá jednotlivá složka.

Svaření kontaktů v dynamickém režimu může nastat příčinou odrazu kontaktu během zapínání, čímž je vytažen elektrický oblouk. Nežádoucí odraz se může i několikrát opakovat. Vzniklý oblouk natahuje styčné plochy kontaktů, jež se po spojení mohou kromě deformace také svařit.



Odolnost kontaktů proti svaření tedy narůstá se zvyšující se teplotou tavení materiálu. Z materiálů často používaných k výrobě kontaktů mají největší odolnost uhlík (C), wolfram (W) a materiály vyrobené práškovou metalurgií, tedy materiály tvořené smícháním velmi vodivého materiálu (např. Ag) s částicemi teplotně stabilních látek. Odolnost mědi proti svaření zvyšuje zoxidovaný povrch. [1, 2]

3.3.3 Odolnost proti opalu obloukem

Dalším důsledkem působení vysoké teploty elektrického oblouku na kontaktní dvojici je tavení a odpařování materiálu. Tavenina žhavého materiálu se smění par se vlivem působení elektrického pole v oblouku, termodynamických sil a elektrodynamických sil protékajícího proudu dostává do prostoru mimo kontakty. Jen malá část materiálu se přenesla z jednoho kontaktu na druhý a v obvodu tak zůstává. Opalem kontaktů elektrickým obloukem tedy vzniká určitý úbytek materiálu kontaktní dvojice, což je velmi nežádoucí děj. Zkracuje se tím životnost kontaktů a deformuje se struktura povrchu styčných ploch, s čímž souvisí další negativní jevy popsané v předchozích kapitolách.

Proces opalu (eroze) začíná během oddalování kontaktů, kdy se vlivem rostoucích ztrát roztaví kontaktní materiál. Tekutá tavenina přemostí malou vzdálenost plošek a vytvoří můstek, jenž se s dalším ohřevem vypaří a zapálí výboj. Během obvykle krátké doby existence můstku dochází k přenosu materiálu mezi kontakty.

Vzniklý elektrický výboj ohřívá povrch kontaktu zejména v místě paty výboje. V závislosti na době hoření se povrch kontaktu mění. Při relativně krátké existenci oblouku vznikají na povrchu vlivem tepelné nesouměrnosti lokálně roztavená místa, při větších proudcích a delší době hoření se vytvoří souvislá plocha roztaveného materiálu s větší hloubkou. U heterogenních materiálů se roztaví nejprve látka s nižší teplotou tání. V každém případě jsou síly atomových a mřížkových vazeb kapalných látek oslabeny a vlivem sil v okolí elektrického oblouku tak může docházet k emisi materiálu z kontaktů.

Další vliv představuje vysoká hustota tepelného toku, následkem které se kontaktní materiál na povrchu i pod ním nejen roztaví, nýbrž i odpaří. Tato blesková přeměna skupenství je doprovázena s výtryskem par z hloubky taveniny, jež s sebou vytlačují i roztavený materiál. Úbytek kontaktů je v takovém případě představován unikajícími plyny a parami, ale především „vystřelováním“ kapiček materiálu do okolního prostoru.

Mezi nejdůležitější parametry, ovlivňující velikost opalu obloukem (erozi kontaktů), patří vlastnosti kontaktních materiálů, jejich tvar, stav povrchu a rozměry, velikost a typ napětí a proudu, polarita, vlastnosti obvodu, doba hoření oblouku, počet odrazů při zapínání, parametry okolního prostředí a další. Shrňme-li poznatky praktických měření vlivu opalu na jednotlivé, v elektrotechnice často používané materiály při shodných podmínkách, můžeme pozorovat největší poměrný úbytek objemu u hliníku a olova. Přibližně poloviční úbytek sledujeme u stříbra, mědi a zinku. Naopak velmi malé opotřebení vlivem opalu prokazuje wolfram, molybden a grafit. [1, 2]

3.3.4 Vypínací schopnost

Závěrečnou fází vypínacího procesu kontaktů je *deionizace* mezikontaktního prostoru po zhasnutí elektrického oblouku. Toto zotavování prostoru souvisí se vznikem zotaveného napětí a jeho elektrického pole, jehož vlivem jsou elektrony hnány ke kladnému kontaktu a kladné ionty k zápornému kontaktu, kde poté rekombinují. Vypínací schopnost kontaktů přitom úzce závisí na rychlosti procesu rekombinace, neboť zejména na této rychlosti je závislý růst poobloukového průrazného napětí U_{pp} . Aby totiž mohlo dojít ke spolehlivému vypnutí obvodu, musí být poobloukové průrazné napětí vždy vyšší než napětí zotavené.

Po uhasnutí elektrického výboje zůstávají na povrchu kontaktů v místech pat oblouku místa o vysoké teplotě, která emitují do prostoru mezi kontakty elektrony. Hustota tohoto termoionického proudu je přitom závislá na vlastnostech kontaktního materiálu, proudu obloukem a době trvání oblouku. Čím je protékající proud větší, tím více nosičů se v mezikontaktním prostoru nachází a elektrická pevnost prostoru je menší. Kvůli tomu je menší i poobloukové průrazné napětí. Největší termoemisní proud vzniká u materiálů s vysokou teplotou tání a vypařování. Dalšími parametry ovlivňujícím průrazné napětí je koncentrace par a částic materiálů kontaktů přítomných v prostoru, technologie jejich výroby a deformace povrchu styčných ploch obloukem. Částičky materiálu pevného skupenství se mohou do prostoru dostat například s parami jiného kovu o nižší výparné teplotě, se kterým tvoří vícesložkový kontaktní materiál. Spolu s plyny podporují vodivost prostředí a deformují elektrické pole. Deformace elektrického pole je způsobena také nerovnoměrné výstupky na povrchu kontaktů, vzniklé tepelnou cestou během hoření oblouku u některých užívaných materiálů. Způsobuje menší velikost poobloukového průrazného napětí a není proto žádaným jevem, což se může projevit zejména při malých vzdálenostech kontaktních ploch. Výhodná je proto velká vzdálenost kontaktů.

Podpořit nárůst průrazného napětí U_{pp} lze i snížením povrchové teploty kontaktů, čehož je možné docílit zejména zkrácením doby hoření oblouku. V případě střídavého obvodu je vhodné zajistit synchronní vypínání, tj. synchronizovat začátek vypínacího procesu těsně před okamžik proudového průchodu nulou. [1]

3.4 Materiály kontaktů

Celá třetí kapitola této práce popisuje nejrůznější požadavky na materiály kontaktů, respektive na jejich vlastnosti. Problém je, že žádný z existujících chemických prvků nikdy nespĺňuje všechny tyto požadavky zároveň. Vzhledem k tomu, že některé materiály mezi ostatními alespoň v části parametrů vynikají, začaly se pro výrobu kontaktů hledat i jejich kombinace, tedy materiály složené z více složek. Mezi takové zástupce patří všemožné slitiny kovů, materiály vyrobené práškovou metalurgií, ale i oxidy, karbidy, koridy či silicidy.

Pro dosažení nejlepších funkčních nebo ekonomických parametrů bývají často využívány také kontakty s povrchovou vrstvou z jiného, kontaktními vlastnostmi lepšího kovu. Je tak dosažena úspora drahých kovů, neboť ty jsou v tenké vrstvě naválcovány na nosný základ obecného kovu. Další možností je kombinace materiálů vytvořením zdvojených kontaktů. Jedna



kontaktní dvojice je svými parametry vhodná k zajištění spolehlivého styku o malých ztrátách v zapnuté poloze a druhá dvojice je využívána k zapínání a vypínání, neboť dokáže dobře odolávat účinkům elektrického oblouku. Tento způsob, využívaný zejména v těžkých spínacích podmínkách, vyžaduje mechanicky poněkud složitější konstrukci.

Kontaktní materiály rozlišujeme dle chemických vlastností do tří základních skupin, odlišujících se především podle odolnosti proti vzniku cizích (korozních) vrstev:

- Ušlechtilé kovy,
- Poloušlechtilé kovy,
- Neušlechtilé kovy.

Čistý kovový povrch lze udržet pouze na žhavém kovu ve vakuu. Působením látek obsažených v okolním prostředí, především kyslíku, totiž na povrchu okamžitě vzniká tenká vrstva kysličníku, tedy oxidu příslušného kovu. Tato vrstva může dále růst a zvětšovat svoji tloušťku; růst korozních vrstev však závisí na ušlechtilosti kovu a na vlastnostech okolí, tzn. na teplotě, tlaku, vlhkosti a obsahu chemických látek. [2]

3.4.1 Ušlechtilé kovy

Nejdražší čisté materiály používané na výrobu kontaktů patří do kategorie ušlechtilých kovů. Jsou výjimečné tím, že se na jejich povrchu ve vzdušném prostředí vytvoří monomolekulární vrstva, která již dále nenarůstá. Vrstva chrání kov před dalším růstem koroze a pro průchod proudu je prakticky zanedbatelná. Používají se především na drobných a jemných kontaktech relátek a spínačů s malými přitlačnými silami. Mezi ušlechtilé kovy řadíme především zlato (Au), platinu (Pt), rhodium (Rh), iridium (Ir) a paladium (Pd). [8]

Zlato (Au) je ze všech prvků skupiny ušlechtilých kovů pro kontaktní styky využíváno nejčastěji. Je kujné, dobře tepelně i elektricky vodivé, měkké a má velkou hustotu. Je chemicky odolný, rozpustit se dá v lučavce královské (směs kyseliny dusičné HNO_3 a kyseliny chlorovodíkové HCl). Zlato se vyskytuje v ryzí podobě, používají se ale i jeho slitiny se stříbrem či s mědí. Velkou výhodou je jeho nízký přechodový odpor, nevýhodou vysoká cena. [5]

Platina (Pt) je svými vlastnostmi velmi podobná zlatu. Není však tak dobře elektricky a tepelně vodivá, vykazuje však pro změnu větší mechanickou odolnost. [2]

3.4.2 Poloušlechtilé kovy

Vznikající korozní kysličníková vrstva na povrchu kovů této skupiny sice není monomolekulární, je však velmi tenká, neboť dosahuje tloušťky v řádu jednotek nanometrů. [8]

Stříbro (Ag) je kov bílé barvy, který se vyznačuje nejlepší elektrickou i tepelnou vodivostí ze všech kovů. Stříbro by bylo možné vzhledem k výborným oxidačním vlastnostem řadit mezi ušlechtilé kovy. Jeho slabou stránkou je však reakce se sloučeninami síry, běžně přítomnými ve vzduchu. Kontaktem stříbra a sirovodíku (H_2S) nebo kysličníku siřičitého (SO_2)



vzniká sulfid stříbrný (Ag_2S), který se projeví viditelným zčernáním povrchu. Jeho přítomnost zásadně narušuje kontaktní vodivost a je proto třeba jeho vrstvu vždy narušit a odstranit velkým přtlakem kontaktů nebo třením během pohybu. Další možností jeho odstranění je tepelnou cestou, neboť při teplotách kolem $850\text{ }^\circ\text{C}$ se sulfid stříbrný opět rozkládá. Používáme stříbro ryzí, nebo v příměsích ve sloučeninách. [2, 5]

Nikl (Ni) je vzhledem ke své stálosti vůči působení vzduchu a vody často využíván k povrchové ochraně jiných kovů. Zoxidovaná vrstva je totiž velmi odolná, její nevýhodou je ale velký přechodový odpor. Nikl je dobře opracovatelný a slouží též jako složka různých slitin. [2]

3.4.3 Neušlechtilé kovy

Neušlechtilé kovy mají z hlediska chemické reaktivity největší sklon k oxidaci. Vytvářená korozivní vrstva proto neustále narůstá. I přes to mezi neušlechtilé kovy patří i měď, která tvoří základ kontaktních materiálů. [8]

Měď (Cu) je nejpoužívanějším materiálem na elektrické kontakty, velmi využíván je i v dalších odvětvích elektrotechniky a bývá součástí řady slitin. Tento kov hnědočervené barvy je oceňován pro svou skvělou vodivost (na druhém místě hned po stříbru), kujnost i dobrou odolnost proti korozi. Na vzduchu totiž jeho povrch reaguje vytvořením tenké nazelenalé vrstvy uhličitanu měďnatého (CuCO_3), známého jako měděnka. Tato zásaditá vrstva poté chrání čistou měď pod sebou proti další korozi a její postup je tak již velmi pomalý. Měděnka se zpětně rozkládá při teplotě nad $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Nevýhodou pro kontakty je její měkkost. [2, 5]

Wolfram (W) se vyznačuje velmi vysokou teplotou tání, čehož je využíváno například ve slitinách či při výrobě žárovkových vláken. Má vysokou hustotu a dobrou odolnost. U kontaktů je ceněn především pro svou houževnatost vůči účinkům elektrických oblouků. [2, 5]

Hliník (Al) je velmi lehký materiál s vynikající vodivostí elektrického proudu. Pro elektrické kontakty se však nehodí pro velmi nízkou teplotu tavení (kolem $650\text{ }^\circ\text{C}$) a špatné mechanické stálosti během vystavení tlaku. Na povrchu hliníku se při reakci se vzdušným prostředím vytváří oxid hlinitý (Al_2O_3), který je mechanicky i chemicky dobře odolný. [5]

3.4.4 Slitiny

Nejčastěji používanými kontaktními materiály jsou slitiny kovů. Ty totiž mají v mnoha ohledech lepší vlastnosti než dílčí čisté kovy a jsou výhodné i z ekonomického pohledu. Velmi rozšířené jsou slitiny mědi, neboť měď, jak již bylo řečeno, má skvělé fyzikální vlastnosti (vodivost, odolnost proti korozi). Je však měkká a tudíž málo odolná proti mechanickému působení. Toto negativum dobře kompenzuje slitina mědi s cínem, *bronz*, která se vyznačuje vyšší tvrdostí. Obsah cínu bývá maximálně 33 %, existuje celá škála dalších příměsí, dle kterých rozlišujeme i další podskupiny bronzu vhodné na výrobu kontaktů, jako jsou například beryliový nebo fosforový bronz. Další užívanou slitinou, oblíbenou díky svému malému přechodovému



odporu, opotřebení i lepší stálostí, je kombinace zlata, stříbra a platiny s mědí a niklem (a jinými prvky). [5]

3.4.5 Práškové hmoty

Slinutím směsi prášků různých kontaktních materiálů při výrobním postupu nazývaném jako prášková metalurgie vzniká poslední skupina materiálů užívaných k výrobě kontaktní dvojice. Podobně jako slitiny i tyto materiály nabízejí vyšší tvrdost, mechanickou a korozní odolnost, elektrickou a tepelnou vodivost a odolnost proti působení oblouku. Základní látkou bývá wolfram nebo molybden, který bývá ve formě miniaturních částic vmíchán do tekutého kovu, např. do mědi nebo stříbra, dále lisovaného. Mechanickou a opalnou odolnost ve vzniklé směsi zajišťuje prášková kostra wolframu či molybdenu. Dobrou elektrickou a tepelnou vodivost materiálu přináší měď (resp. stříbro). Jiným způsobem výroby slinuté hmoty je prolití roztavené mědi či stříbra do houbovitě kostry z hrubozrnného wolframu (nebo molybdenu). Přítom procentuální množství částic v tavenině ovlivňuje její vlastnosti, neboť velký obsah zaručuje velkou odolnost na úkor vodivosti a naopak.

Ag-CdO – Tyto materiály vykazují relativně velkou odolnost proti opalu obloukem, nejlepších parametrů dosahují při poměru Ag:CdO 88:12. Jsou vhodné pro spínače střídavých proudů o velikosti 50 až 3000 A, nebo také pro spínače obvodů malých jmenovitých, avšak velmi vysokých zapínacích proudů. Používají se i v relé.

Ag-C – S příměsí cca 5 % grafitu jsou kontakty prakticky téměř nesvařitelné. Na úkor vysoké odolnosti proti svaření mají malou odolnost proti opalu, vypínací schopnost a vlivem vytváření sazí i menší napět'ovou odolnost. Téměř neoxidují. Jsou používány buď v kombinaci s jinými nepárovými kontakty, nebo tam, kde je třeba zajistit bezpečnost proti svaření kontaktů (např. ve spínačích baterií a jističích).

Ag-Ni – Materiál s dobrou opalovou odolností a vypínací schopností blízkí se Ag-CdO, má ale menší tvrdost. Pro lepší odolnost před svařením se využívá kombinace s druhým kontaktem Ag-C. Obsah niklu bývá kolem 10–40 %. Užívají se ve výkonových spínačích do 400 A, při kombinaci s kontaktem Ag-C mohou zapínací i vypínací proudy dosahovat až 20 kA. Objevuje se v domácích spotřebičích, jističích i relé.

Cu-W, Ag-W – Materiály na bázi wolframu jsou velmi odolné proti účinkům oblouku vysokého proudu, obsah wolframu v nich dosahuje hodnoty mezi 70 a 80 %. Proto se vyskytují v přístrojích s vysokou vypínací schopností vypínajících proudy až v desítkách kiloampérů. Špatná elektrická vodivost wolframu se ale projevuje velkým stykovým odporem, proto je vhodné tyto látky přednostně používat jen na opalovací kontakty nebo hroty a vodivé spojení kontaktů zajistit jiným materiálem. [1, 2]

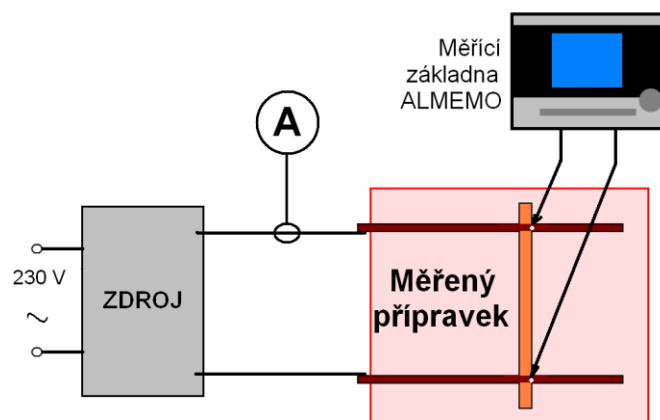
4 MĚŘENÍ OTEPLENÍ KONTAKTŮ

4.1 Úvod

Pro názornou demonstraci vlivů působení elektrického proudu protékaného vodičem a v kontaktním styku je možno využít přípravku k úloze „Měření elektrodynamických sil a oteplení kontaktů“ v předmětu „Stavba a výroba elektrických přístrojů“ FEKT VUT Brno. Laboratorní přípravek v roce 2015 navrhl a zkonstruoval Ing. David Šimek. Přípravek je navržen pro měření dvou úloh - elektrodynamické síly a oteplení kontaktů, nás však nyní bude dále zajímat pouze druhá jmenovaná.

4.2 Popis přípravku

Jako základna měřícího přípravku slouží dřevovláknitá deska MDF o rozměrech přibližně 60 x 60 cm, na straně zdroje podložena tak, aby tvořila nakloněnou rovinu s úhlem α . Na desce jsou pevně uchyceny dva rovnoběžné měděné přívodní pasy s měnitelnou vzdáleností, jež jsou uprostřed propojeny volnou měděnou trubkou. Její dotyky s přívodními pasy představují dvě kontaktní dvojice, které jsou předmětem našeho zkoumání. Volná trubka mezi pasy nevisí volně, neboť je podepřena izolovanými „kolejničkami“. Přítlačná síla kontaktů se díky tomu nerovná tíhové síle trubky, ale pouze její složce rovnoběžné s rovinou. Výhodou je, že tuto sílu můžeme libovolně nastavovat prostřednictvím úhlu α . V každém přívodním pasu je zabudován jeden termočlánek, situovaný v těsné blízkosti kontaktu. Termočlánek je propojen s měřicí základnou Almemo, která vzhledem k nastaveným parametrům termočlánek zaznamenává a cyklicky ukládá aktuální teplotu styku. Informaci o velikosti protékaného proudu udává multimetr napojený na Rogovského pásek s převodem 1 mV / 1 A. [4]



Obr. 4. 1: Schéma zapojení úlohy

4.3 Teoretický výpočet

Při určování oteplení kontaktů přípravku předpokládáme, že veškeré teplo uvolněné v kontaktním styku je odváděno do okolních částí vodiče. Tedy ochlazování přímo v kontaktním styku vlivem proudění vzduchu a vyzařování je vzhledem ke geometrickému uspořádání soustavy prakticky zanedbatelné. Oteplení kontaktů je tedy způsobeno stykovým odporem a tepelný výkon P_Z je proto vyjádřen pomocí Jouleova zákona:

$$P_Z dt = R_S I^2 dt \quad (33)$$

Proud I protékající soustavou neovlivníme, proto je třeba se zabývat odporem ve styku R_S . Z rovnice (34) je možné pozorovat, že styčný odpor je přímo úměrný materiálové konstantě k a nepřímo úměrný přítláčné síle F_P :

$$R_S = k \cdot F_P^{-n} = \frac{k}{F_P^n} \quad (34)$$

kde n je koeficient typu styku ($n = 1$ - plošný, $n = 0,7$ - přímkový a $n = 0,5$ - bodový styk). Materiálová konstanta k se liší pro různé materiály a kvalitu jejich povrchu, u mědi se pohybuje mezi $6 \cdot 10^{-4}$ pro čistý a $5 \cdot 10^{-3}$ pro zkorodovaný povrch. Pro co nejnižší ztráty je tedy snaha o dokonale čistý plošný kontaktní styk a co největší přítlak, samozřejmě s ohledem na opotřebení kontaktů. V případě našeho měření budeme pracovat vždy s čerstvě očištěnými povrchy, proto stanovíme velikost $k = 6 \cdot 10^{-4}$. Typ styku budeme předpokládat bodový, tedy $n = 0,5$.

4.3.1 Výpočet přítláčné síly kontaktů

Pro výpočet přítláčné síly F_P je nutno znát velikost elektrodynamické síly F_{een} (působící na trubku), statický valivý odpor F_T (minimální síla nutná k uvedení válcového tělesa do pohybu), tíhovou sílu F_G , respektive obě její složky, tj. sílu ve směru pohybu F_{pg} a normálovou sílu F_n . Holmovu (elektrodynamickou odpudivou) sílu ve výpočtech, vzhledem k její malé velikosti pro tak nízký proud, zanedbáme. Rovnice pro výpočet přítláčné síly je tvaru:

$$F_P = F_{een} + F_{pg} - F_T \quad (35)$$

Je však důležité si uvědomit, že tento vztah se využívá pro výpočet přítláčné síly v běžných kontaktech a nepředpokládá s výskytem jevů, jako je lepení či měknutí. Náš laboratorní přípravek se naopak snaží uměle vyvolat podmínky vhodné pro to, aby k těmto jevům došlo. Spolu s uvážením setrvačnosti regulace proudu je tedy jasné, že hodnota přítláčné síly bude dosti proměnlivá a její vypočítanou teoretickou velikost spolu s dalšími navazujícími výpočty lze brát pouze orientačně.

4.3.2 Výpočet elektrodynamických sil

Vztahy pro výpočet elektrodynamických sil známe pro U-smyčku s konečně a nekonečně dlouhými rovnoběžnými přívodními vodiči. Pro vodiče známé délky h počítáme sílu z rovnice:

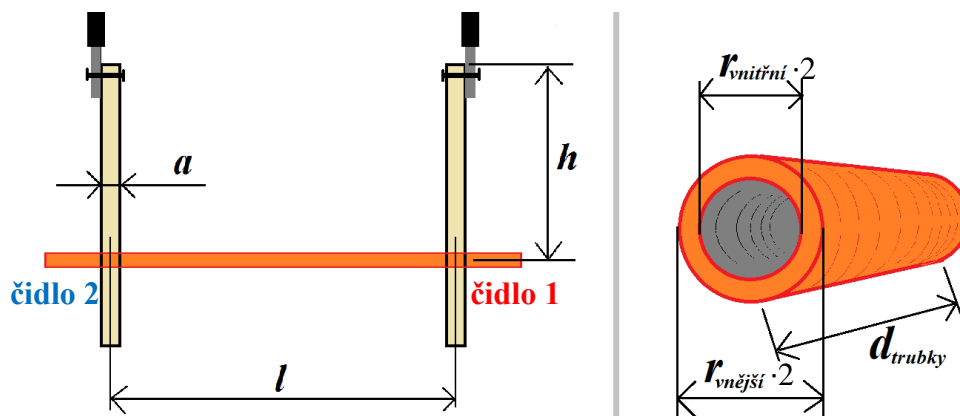
$$F_{EEK} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \ln \left(\frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) \quad (36)$$

kde I je velikost protékaného proudu, a šířka přívodních pásů a l je jejich osová vzdálenost. Při překročení určité délky přívodů h je další přírůstek síly tak malý, že jej lze zanedbat. V takovém případě lze vliv elektrodynamických sil počítat z jedoduššího vztahu, který předpokládá přívodní vodiče nekonečné délky:

$$F_{EEN} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \quad (37)$$

Laboratorní přípravek pro měření oteplování kontaktů je elektrodynamickými silami ovlivňován přímo, z hlediska velikosti přitlačné síly kontaktního styku. Rozměry přípravku jsou:

- délka přívodních vodičů protékaných proudem	$h = 1186 \text{ mm}$
- osová vzdálenost přívodních vodičů	$l = 394 \text{ mm}$
- šířka vodiče	$a = 4 \text{ mm}$
- vnější poloměr trubky	$r_{\text{vnější}} = 5 \text{ mm}$
- vnitřní poloměr trubky	$r_{\text{vnitřní}} = 4 \text{ mm}$
- délka trubky	$d_{\text{trubky}} = 501 \text{ mm}$
- hustota mědi	$\rho_{\text{Cu}} = 8960 \text{ kg/m}^3$



Obr. 4. 2: Rozměry laboratorního přípravku

Tab. 4. 1 – Závislost elektrodynamické síly na proudu přípravkem

I [A]	F _{een} [N]	F _{eek} [N]
300	0,0951	0,0946
350	0,1294	0,1288
400	0,1691	0,1682
450	0,2140	0,2128

Příklad výpočtu:

$$F_{een} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 300^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 0,394}{0,004}\right) \doteq \mathbf{0,0951 \text{ N}}$$

$$F_{eek} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 300^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 0,394}{0,004} \cdot \frac{1,186 + \sqrt{1,186^2 + \frac{0,004^2}{4}}}{1,186 + \sqrt{1,186^2 + 0,394^2}}\right) \doteq \mathbf{0,0946 \text{ N}}$$

Z tabulky 4. 1 je možné poznat, že pro dané rozměry přípravku se oba způsoby výpočtu ED sil liší jen o přibližně 0,5 %, bez závislosti na protékaném proudu. Proto můžeme ve výpočtech předpokládat nekonečnou délku vodičů při vzniku zanedbatelné chyby.

Při dalších výpočtech je nutno si uvědomit, že celková síla se vždy přibližně rovnoměrně rozdělí mezi oba kontakty. Bude se proto dělit dvěma.

4.3.3 Výpočet statického valivého odporu

Statický valivý odpor zmenšuje velikost přítláčné síly kontaktů. Pro jeho výpočet potřebujeme znát poloměr trubky použité v přípravku $r_{vnější} = 5 \text{ mm}$, rameno valivého odporu ξ (pro dotyk měděný válec-ocelová kolejnice je $\xi = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}$) a normálovou složku tíhové síly trubky F_n :

$$F_T = \frac{\xi \cdot F_n}{r} \tag{38}$$

4.3.4 Výpočet složek tíhové síly

Hmotnost měděné kulatiny vypočítáme pomocí jejích rozměrů a hustoty materiálu.

Objem trubky:

$$V_{trubky} = d \cdot (\pi \cdot r_{vnější}^2 - \pi \cdot r_{vnitřní}^2) = 501 \cdot (\pi \cdot 5^2 - \pi \cdot 4^2) \doteq \mathbf{14,165 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}$$



Hmotnost trubky:

$$m_{\text{trubky}} = V_{\text{trubky}} \cdot \rho_{\text{Cu}} = 14,165 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 \doteq \mathbf{0,12692 \text{ kg}}$$

Tíhová síla trubky na jeden kontakt:

$$F_g = \frac{m_{\text{trubky}}}{2} \cdot g = \frac{0,12692}{2} \cdot 9,8128 = \mathbf{0,6227 \text{ N}}$$

Složky tíhové síly:

Síla ve směru pohybu (=přítlačná síla kontaktu):

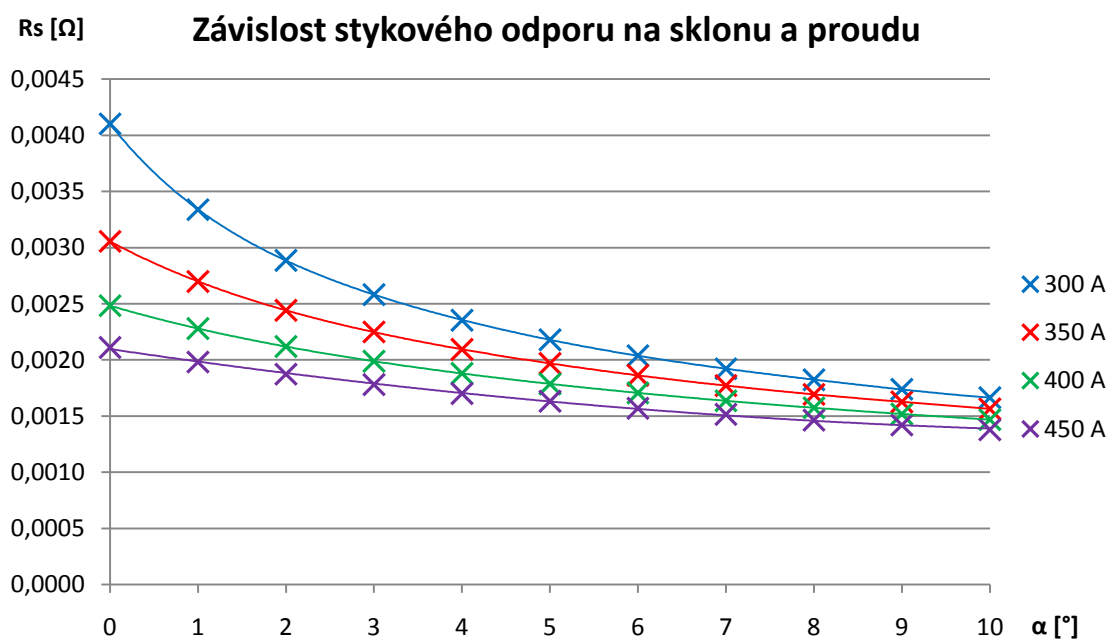
$$F_{pg} = \cos(90 - \alpha) \cdot F_g \quad (39)$$

Normálová síla:

$$F_n = \sin(90 - \alpha) \cdot F_g \quad (40)$$

4.3.5 Výpočet stykového odporu

Výpočet stykového odporu dle rovnice (34) jsme pro porovnání provedli pro čtyři různé velikosti proudů (300 – 450 A) a pro rozsah úhlu naklonění $0^\circ - 10^\circ$. Výsledky výpočtů shrnuje tabulka v příloze 2, názornější je však grafické zobrazení závislosti stykového odporu na úhlu a proudu v obrázku 4. 3.



Obr. 4. 3 – Graf závislosti stykového odporu na úhlu sklonu a proudu.

4.3.6 Predikce výskytu jevů v kontaktech - měknutí a svaření

Při určité velikosti oteplení kontaktní dvojice, způsobeného vysokým stykovým odporem, může dojít k měknutí materiálu či k pevnému svaření obou ploch kontaktů. Teploty, popřípadě napětí měknutí a svaření pro měď jsou uvedeny v tabulce 1. přílohy. Aby k měknutí materiálu vlivem tepelných ztrát ve styku nedošlo, musí platit, že:

$$R_S < \frac{U_{sm}}{2 \cdot I} = R_{sm} \quad (41)$$

a aby nedošlo k jeho svaření, musí být:

$$R_S < \frac{U_{ss}}{c_k \cdot I} = R_{ss} \quad (42)$$

kde $U_{sm} = 0,12$ V je napětí měknutí a $U_{ss} = 0,43$ V napětí svaření elektrického styku (obojí viz příloha 1), I provozní proud a $c_k = 1,16$ (pro měď) je součinitel změny měrného odporu kontaktní úžiny (kontaktní součinitel). Porovnání teoretické velikosti odporu styku vypočtené výše (příloha 2) s hodnotami v tabulce 4. 3 umožňuje předpovědět děje vyskytující se během měření. Vidíme totiž, že ve všech uvažovaných případech (proudů i úhlů) je stykový odpor několikanásobně větší než minimální odpor měknutí R_{sm} a dokonce je i vždy větší než minimální odpor svaření R_{ss} . Téměř s jistotou tedy během měření dojde k měknutí materiálu, stejně tak jako i k občasnému svaření. Oba jevy jsou však v našem experimentu žádané.

Tab. 4. 2 – Minimální hodnoty stykových odporů pro vznik jevů

I [A]	R_{sm} [Ω]	R_{ss} [Ω]
300	0,0002	0,0012
350	0,0002	0,0011
400	0,0002	0,0009
450	0,0001	0,0008

Příklad výpočtů:

$$R_{sm} = \frac{U_{sm}}{2 \cdot I} = \frac{0,12}{2 \cdot 300} = 0,0002 \Omega$$

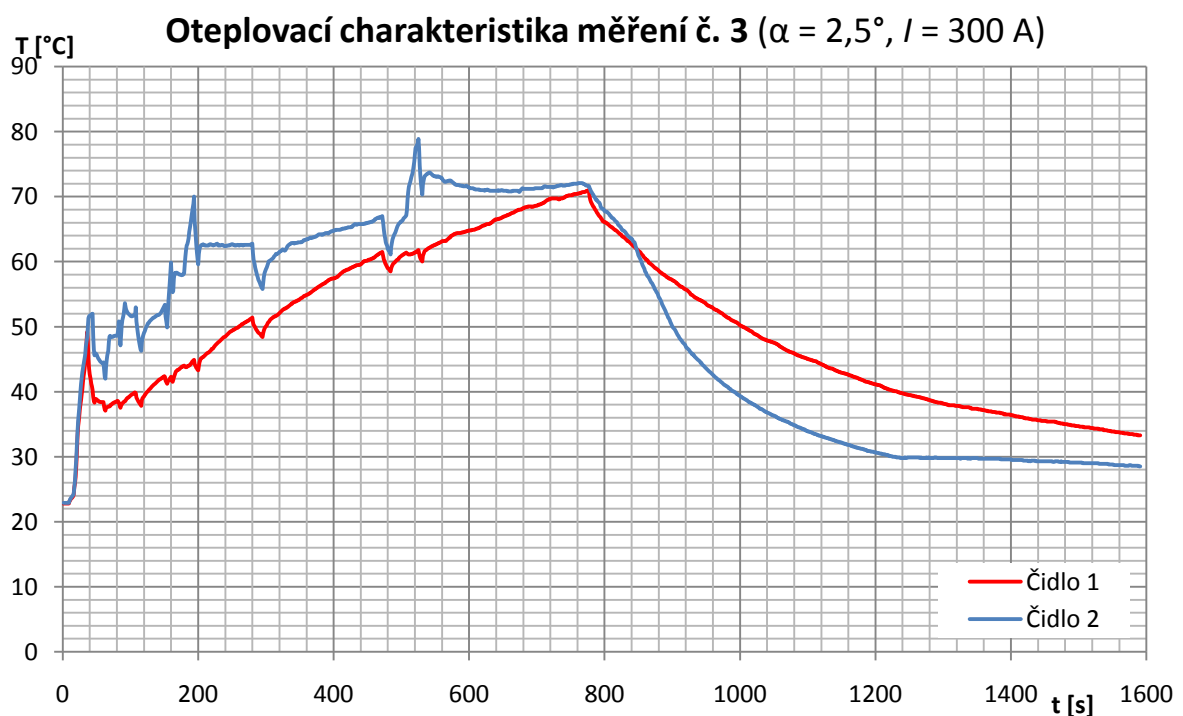
$$R_{ss} = \frac{U_{ss}}{c_k \cdot I} = \frac{0,43}{1,16 \cdot 300} = 0,0012 \Omega$$

4.4 Měření oteplovací charakteristiky

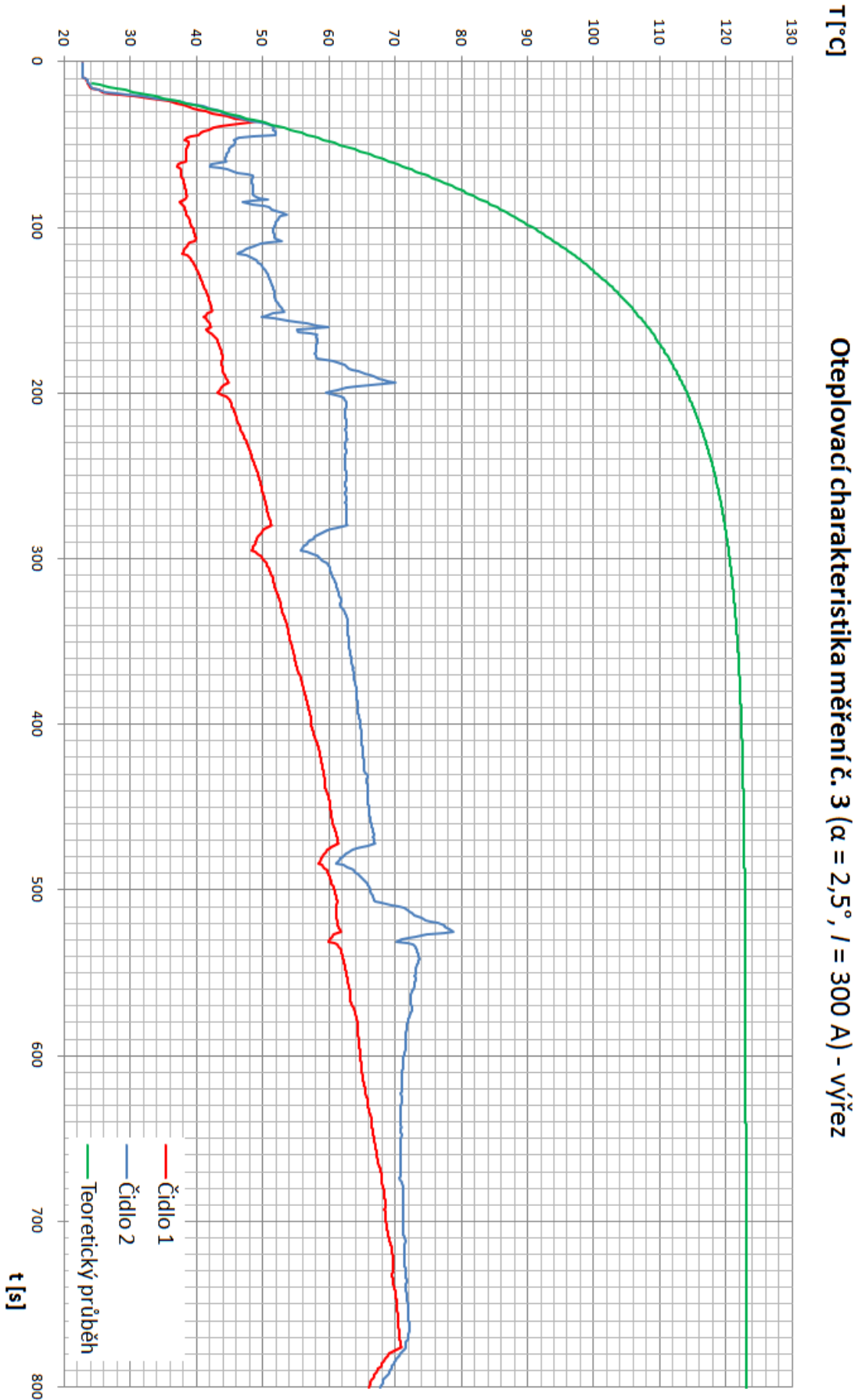
Měření na popisovaném laboratorním přípravku jsme provedli celkem čtyřikrát, pokaždé s jinými vstupními parametry (nastavení proudu a úhlu α). Z těchto pokusů, jejichž oteplovací charakteristiky jsou uvedeny v příloze 2, jsme názorně vybrali experiment číslo 3. Před třetím měřením jsme nastavili úhel sklonu přípravku $\alpha = 2,5^\circ$ a po dobu měření udržovali proud přibližně **300 A**. Průběh teplot obou čidel během 26 minut dlouhého měření znázorňuje obrázek 4. 4, detailní výřez části měření pod proudem pak ukazuje obrázek 4. 5. (Po vypnutí napájení v čase $t = 780$ s byl kontakt u čidla 2 nuceně ochlazován ventilátorem.)

Tab. 4. 3. – Seznam použitých přístrojů

Regulovaný zdroj proudu	KPB Intra CTR2 (out: max 2 V, 1500 A)
Základna	ALMEMO 5690-2
Multimetr	Hexagon 340A
Rogovského cívka	AmpFLEX (s převodníkem 1 mV/1 A)



Obr. 4. 4: Průběh oteplovací charakteristiky celého měření č. 3



Obr. 4. 5: Průběh oteplovací charakteristiky části měření č. 3 pod proudem.

4.4.1 Teoretický průběh

Po zapojení obvodu přípravku ke zdroji sledujeme rychlé oteplování okolí obou kontaktních dvojic, jenž má exponenciální charakter. Z grafického znázornění měřených hodnot dostaneme oteplovací charakteristiku, jejíž teoretický průběh popisuje rovnice:

$$\vartheta(t) = \vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (43)$$

v níž ϑ_{max} představuje teoretickou maximální hodnotu oteplení, nedošlo-li by k měknutí, t je čas a τ časová oteplovací konstanta. [4]

Vyjádřením časové konstanty τ ze vztahu (43) dostaneme rovnici (44), díky níž lze časovou konstantu získat dosazením hodnot z počáteční lineární části charakteristiky. V našem případě se jedná o prvních cca 20 vteřin po zahájení experimentu, jak je zřetelné z obrázku 4. 5.

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{max}}\right)} \quad (44)$$

Z naměřených hodnot vybereme bod v čase 18 sekund od zahájení experimentu, kdy oteplení proti počáteční teplotě dosáhlo hodnoty $\vartheta = 20,8$ K. Maximální oteplení zvolíme $\vartheta_{max}=100^{\circ}\text{C}$. Časová konstanta se potom vypočítá jako:

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{max}}\right)} = \frac{-18}{\ln\left(1 - \frac{20,8}{100}\right)} \doteq 77,2 \text{ s}$$

Teoretický průběh oteplovací charakteristiky, vykreslený v obr. 4. 5 zelenou barvou, jsme získali dosazením τ a ϑ_{max} do rovnice (43).

4.4.2 Skutečný průběh - vyhodnocení

Jak již bylo řečeno, teoretický průběh počítá s konstantním stykovým odporem, jenž je však ve skutečnosti silně proměnlivý. Jeho změny lze pozorovat na skutečném (měřeném) průběhu (obr. 4. 5). V určitých časových okamžicích došlo vlivem Holmovy síly k odskokům kontaktů a tím způsobenému přerušení proudu. Během našeho měření se tak stalo například v časech 60, 110, 280 a 470 sekund. Průběhy teplot obou čidel poté shodně kopírují ochlazovací křivku.

Jindy pro změnu došlo díky rostoucí teplotě k lokálnímu lepení (spojení) materiálu v některém kontaktním styku, čímž se zvětšila styčná plocha, odpor se zmenšil a snížila se tak produkce tepla. V takovém případě sice teplota tohoto kontaktu klesne, druhým kontaktem však vlivem zvýšení vodivosti teče větší proud a odbavuje se v něm větší teplo, než před lepením. Na vykresleném průběhu proto sledujeme rozdílné průběhy pro obě čidla – jedna teplota roste výrazněji než druhá (viz čas 40 a 160 s).



Třetím vyskytujícím se případem je měknutí materiálu. Tehdy opět dojde ke zvětšení kontaktní plošky, tepelné ztráty se mírně sníží, teplo však vzniká i nadále. Proto celkové oteplení kontaktu po chvilce klesání opět začne růst a na průběhu se vytvoří charakteristická jamka, jak můžeme sledovat například v časech 90 a 170 sekund.

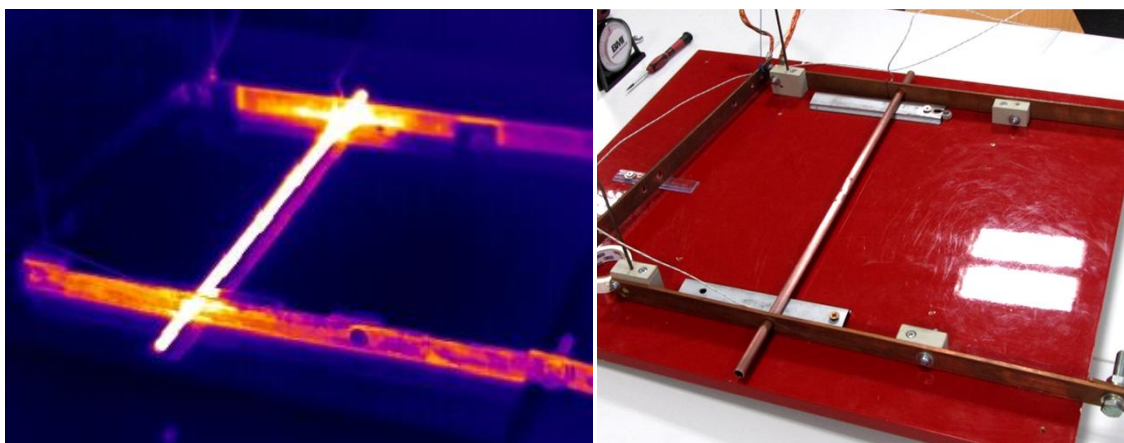
Průběhy teplot obou kontaktních dvojic jsou rozdílné, neboť ke sledovaným jevům nedochází na kontaktech současně. Svůj vliv má i rozdílná kvalita povrchu každého kontaktu, čímž vznikají různě velké styčné plochy.

4.4.3 Chyby měření

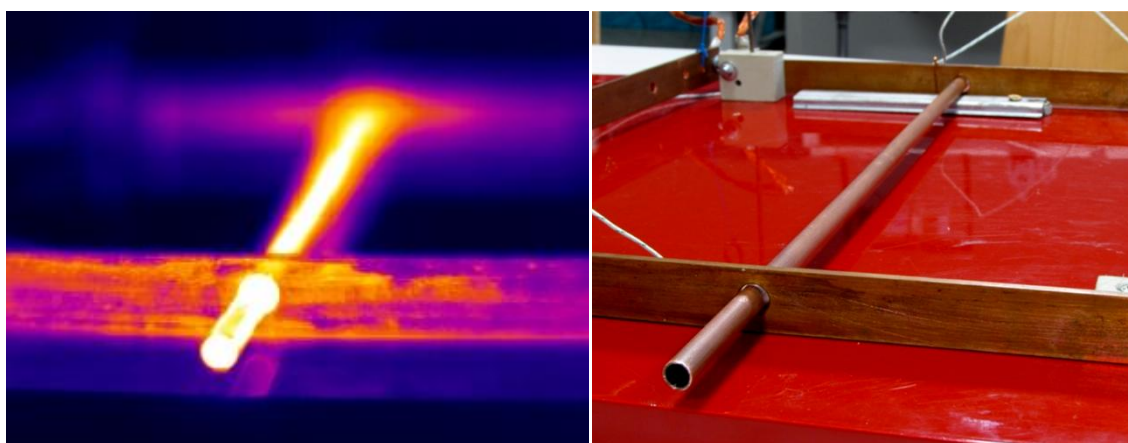
Přestože nám laboratorní přípravek umožňuje názorně demonstrovat jevy na nekvalitním kontaktním styku, nesmíme zapomenout na chyby, vznikající během měření. Především je třeba brát v potaz samotný způsob měření teploty kontaktů, zajištěný termočláanky. Vzhledem na praktickou proveditelnost přípravku jsou termočláanky zakovány v těsné blízkosti kontaktního styku, čímž však neměří skutečnou teplotu ve styku, nýbrž teplotu o daný tepelný spád nižší. Názorně lze tuto chybu vidět na oteplovací charakteristice, ve které pozorujeme na mnoha místech měknutí, přestože uváděná aktuální teplota styku zdaleka nedosahuje tabulkové teploty měknutí mědi (viz. tab. 1. přílohy: $\vartheta_m = 190^\circ \text{C}$). Ve skutečnosti však této teploty styk dosáhl.

Další problém představují poměrně velké masy tepelně vodivého materiálu. Experimentem se totiž snažíme dosáhnout kritických hodnot teploty při současném působení velmi malé přitlačné síly (tedy přesný opak toho, co od kontaktů požadujeme v přístrojích). Měření by probíhalo mnohem rychleji a výsledky by byly mnohem názornější, nebýt významného odvodu tepla z kontaktního styku do sousedících kovových materiálů a do vzdušného okolí. Snímky z termokamery potvrzují velkou teplotu přívodních vodičů a především trubky (viz obr. 4. 6 a 7). Tím je významně zvětšena plocha pro chlazení přípravku prouděním a zářením. Vysoká teplota navíc způsobuje povrchovou oxidaci mědi, což spolu s geometrickým uspořádáním trubky dále zvyšuje tepelnou emisivitu soustavy.

Zmiňme též chybu vzniklou nemožností přesného určení přitlačné síly – vlivem tepelných jevů velikost proudu protékajícího soustavou neustále kolísá, což ovlivňuje elektrodynamické síly. Další chyby pak vytváří nemožnost zcela přesného nastavení výšky trubky, úhlu sklonu α , určení koeficientu typu styku n a materiálové konstanty k .



Obr. 4. 6: Přípravek během měření (foceno termokamerou)



Obr. 4. 7: Detail kontaktu během měření (foceno termokamerou)



Obr. 4. 8: Detail opotřeбенého kontaktu (trubky) po experimentu.



4.5 Zhodnocení měření

Pro pozorování účinků působení elektrického proudu na kontaktní dvojici jsme provedli měření na určeném laboratorním přípravku. Teoretický výpočet stykového odporu podpořil předpoklad výskytu tepelných jevů vznikajících v kontaktech – měknutí a svařování materiálů. Tyto jevy lze skutečně ve všech čtyřech naměřených oteplovacích charakteristikách pozorovat v podobě kolísání teplot. Největším problémem při měření je odvod tepla z kontaktu do masy okolních vodičů, neboť v přípravku chceme vytvořit lokální ohřívání styku a co nejmenší odvod tepla, tedy podmínky opačné, než jaké se snažíme vytvořit v elektrických přístrojích. Chybu z hlediska určování teplot v kontaktech do měření zanáší termočlánky, z technických důvodů umístěné mimo styk. Pro pouhé pozorování jevů však tato chyba není podstatná. Problém přesného určení přitlaku kontaktů by bylo možné vyřešit například umělým přitlakem siloměry. Další zpřesnění měření by přineslo zdokonalení systému nastavitelné výšky kolejniček podpírajících trubku, minimalizace vlivu elektrodynamických sil U-smyčky přiblížením přívodních vodičů, nebo zrychlení procesu ohřevu změnou geometrického uspořádání soustavy, popřípadě změnou emisivity. Některé z těchto úprav byly na přípravku následně provedeny a blíže je popisuje, včetně nového měření, kapitola 6.

5 TEORETICKÝ VÝPOČET OTEPLENÍ PŘÍPRAVKU

V této kapitole je proveden teoretický výpočet ustáleného oteplení laboratorního přípravku, který umožní vytvořit matematický model celé soustavy. Postup výpočtu vychází z knihy *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů* a je během něj použita řada zjednodušení. U odečítaných hodnot je vždy uveden odkaz na zdrojovou tabulku či graf.

5.1 Výpočet náhradního schématu oteplení přívodního vodiče

5.1.1 Přepočítání měrného odporu na předpokládanou teplotu

Proudovodná dráha přípravku je tvořena pasovinami a trubkou z mědi čistoty 99,9%. Pro teoretický výpočet oteplení tedy zanedbáme vliv příměsí, neboť vzniklá chyba bude zanedbatelná. Musíme ovšem počítat se změnou měrného odporu mědi při změně teploty, což vyřeší vztah:

$$\rho_{CuT} = \rho_{Cu20} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) \quad [\Omega \cdot \text{m}^{-1}; \Omega \cdot \text{m}^{-1}; \text{K}^{-1}; \text{K}] \quad (45)$$

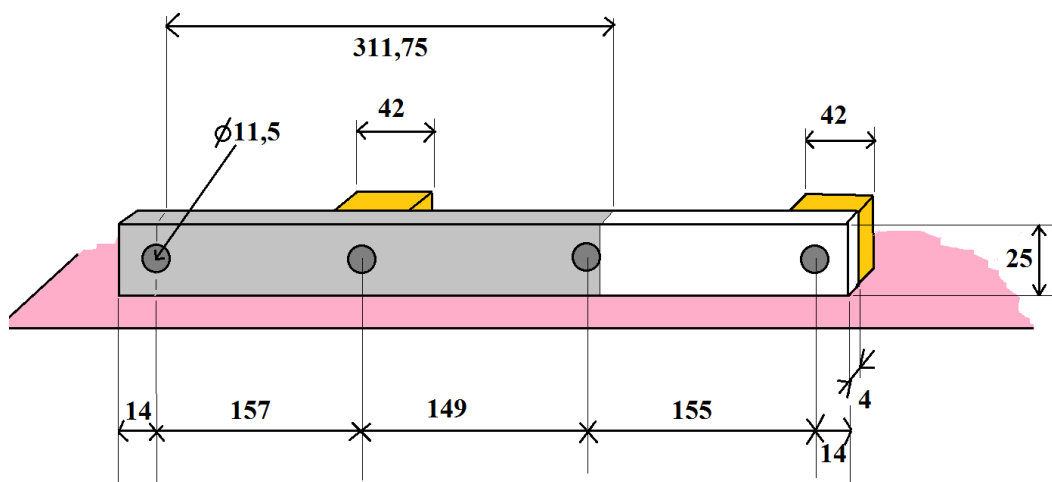
Předpokládané oteplení $\theta = 50 \text{ K}$

Rezistivita mědi při 20 °C $\rho_{Cu20} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$

Teplotní součinitel mědi $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$

Po dosazení bude výsledný měrný odpor

$$\rho_{Cu70} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 50) = 2,016 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$



Obr. 5. 1: Přívodní vodič



5.1.2 Určení koeficientu zhuštění proudnic

V místech se zmenšeným průřezem dochází k nárůstu proudové hustoty, tj. zhuštění proudnic. V přívodním vodiči jsou tato místa dvě, způsobená dvěma kruhovými otvory téhož průřezu (označené písmeny A a B). Vzhledem k jejich umístění za sebou je výpočet koeficientu zhuštění proudnic v obou případech stejný. Třetí díru ve výpočtu neuvažujeme, neboť se nachází v místě spojení dvou pasovin a nepředstavuje proto pro proudnice překážku.

Koeficient zhuštění se určuje z grafu [[9], str.31, obr. 2-5 (typ 4)]. Pro určení je potřeba nejprve spočítat příslušné hodnoty, vycházející z rozměrů pasoviny a otvoru: šířka pásu $b = 25$ mm, tloušťka $h = 4$ mm, průměr díry $d = 11,5$ mm.

$$a = b - d = 25 - 11,5 = 13,5 \text{ mm}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{13,5}{25} = 0,54$$

Nyní tedy můžeme z grafu odečíst koeficient zhuštění pro oba otvory:

$$\mathbf{K_1 = K_2 = 1,67}$$

5.1.3 Určení činitele skinefektu

Z rozměrů přípojnice určíme hodnoty potřebné pro odečet z grafu ($f=50$ Hz):

$$\frac{b}{h} = \frac{25}{4} = 6,25$$

$$S = b \cdot h = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,0001 \text{ m}^2$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu}}} = \sqrt{\frac{10^{-4} \cdot 50}{2,016 \cdot 10^{-8}}} \doteq 498$$

Činitel skinu dle [[9], str.29, obr. 2-4] poté bude:

$$\mathbf{K_s = 1,0}$$

Zjistili jsme, že vliv skinefektu pro tak malý průřez je zanedbatelný, proto jej již nebudeme v našich výpočtech více uvažovat.

5.1.4 Výpočet střední délky proudovodné dráhy v přívodním vodiči

Střední délka proudovodné dráhy je imaginární čára vedoucí středem přípojnice od přívodu po místo kontaktu. Určíme pomocí obrázku 5. 1.

$$l = 157 + 149 + 11,5 / 2 = \mathbf{311,75 \text{ mm}}$$

5.1.5 Výpočet elektrického odporu přívodu

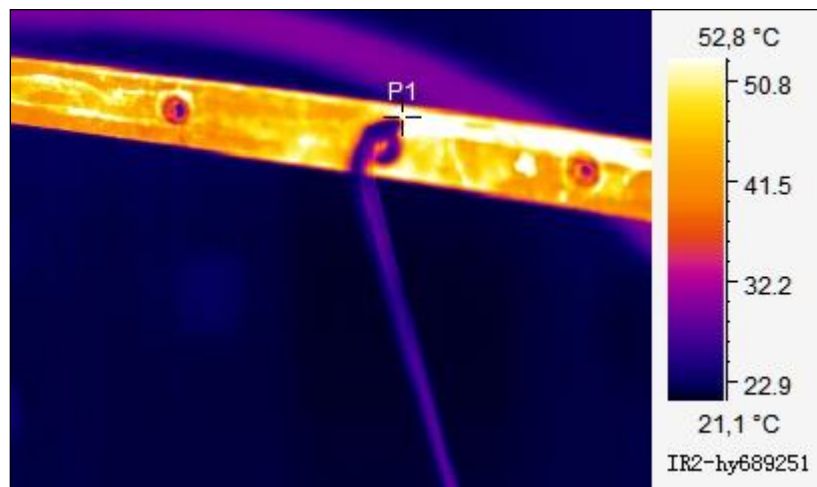
Na základě předchozích výpočtů nyní můžeme vypočítat elektrický odpor přívodního vodiče:

$$R_p = \frac{\rho_{Cu}}{S} \cdot [l + b \cdot (K_1 + K_2 - 2)] \cdot K_S$$

$$R_p = \frac{2,016 \cdot 10^{-8}}{10^{-4}} \cdot [0,31175 + 25 \cdot 10^{-3}(1,67 + 1,67 - 2)] \cdot 1 = \mathbf{6,96 \cdot 10^{-5} \Omega}$$

5.1.6 Určení emisivity použitých materiálů

Pro další výpočty bylo třeba zjistit emisivitu použité mědi, neboť její hodnota se může lišit v rozmezí od 0,1 (pro vyleštěný čistý povrch) až po 0,8 pro zoxidovanou měď. Vzorek pasoviny jsme zahřáli na teplotu měřenou kontaktním teploměrem a poté jsme na termokameře nastavovali emisivitu tak, aby se teplota zobrazovaná termokamerou shodovala s teplotou indikovanou teploměrem. Měřením jsme určili emisivitu $E_Z = \mathbf{0,72}$, kterou budeme uvažovat pro všechny následující výpočty.



Obr. 5. 2: Určování emisivity termokamerou

5.1.7 Určení náhradní chladivosti povrchu

a) Chladivost záření

Základní vzorec odečtený z [[9], str. 52, tab. 2-44], platný pro teplotu $T = 40 \text{ °C}$ a emisivitu $E_Z = 0,8$, je tvaru:

$$\alpha_Z = N \cdot (5,6 + 0,034 \cdot \theta)$$



My ale počítáme s okolní teplotou $T_0 = 20 \text{ °C}$ a emisivitou $E_Z = 0,72$, proto je tento vzorec třeba upravit lineární aproximací. Pomocí okolních vzorců v tabulce zjistíme spád prvního členu $0,2/5 \text{ K}$ a $2,6/0,4E_Z$ a druhého členu $0,001/5 \text{ K}$ a $0,017/0,4E_Z$. Činitel stínění odhadneme na $N = 0,8$. Po úpravě vzorce bude chladiivost zářením rovna:

$$\begin{aligned}\alpha_Z &= 0,8 \cdot \left[\left(5,6 - 2,6 \cdot \frac{0,08}{0,4} \right) - 0,2 \cdot 4 + \left[\left(0,034 - 0,017 \cdot \frac{0,08}{0,4} \right) - 0,001 \cdot 4 \right] \cdot 50 \right] = \\ &= 4,49 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}\end{aligned}$$

b) Chladiivost prouděním

Protože podobně jako v případě výpočtu chladiivosti zářením není v tabulce [[9], str. 52, tab. 2-44] uveden vzorec přímo pro náš konkrétní případ (stěna šíře 25 mm), vybereme z ní vzorce tuto šířku ohraničující:

$$\text{Stěna šíře 10 mm: } \alpha_{K10} = 6 + 0,090 \cdot \theta$$

$$\text{Stěna šíře 50 mm: } \alpha_{K50} = 4,3 + 0,055 \cdot \theta$$

Nyní provedeme lineární aproximaci pro stěnu šíře 25 mm a vypočítáme chladiivost prouděním:

$$\alpha_K = \left(4,3 + \frac{6-4,3}{8} \cdot 5 \right) + \left(0,055 + \frac{0,09-0,055}{8} \cdot 5 \right) \cdot 50 = 9,21 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková náhradní chladiivost

Výsledná náhradní chladiivost se dle ([9], str. 119) vypočítá jako součet obou složek:

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 4,49 + 9,21 = \mathbf{13,70 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}}$$

5.1.8 Výpočet chladicí plochy

Chladicí plochou myslíme povrch podél proudovodné dráhy. Nezapočítáme do ní konec vodiče neprotékaný proudem (chová se jako chladič), ani části povrchu, k nimž není přístup vzduchu. Vliv šroubů na chlazení uvažujeme jako 5% plochy navíc.

$$\begin{aligned}P_p &= ((325,75 \cdot 25) \cdot 2 + (325,75 \cdot 4) + (25 \cdot 4) - (42 \cdot 25)) \cdot 10^{-6} \cdot 1,05 = \\ &= \mathbf{17,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}\end{aligned}$$



5.1.9 Výpočet velikosti chladícího obvodu

Použijeme vztah dle ([9], str. 119):

$$O_{VP} = \frac{P_P}{l} = \frac{0,01747}{0,32575} = \mathbf{0,05363 \text{ m}}$$

5.1.10 Veličiny náhradního π -článku přírodního vodiče

Díky předchozím výpočtům jsme získali všechny hodnoty nutné pro určení veličin náhradního π -článku tepelného schématu části přírodního vodiče protékané proudem ([9], str. 119). Jedná se o podélný a příčný tepelný odpor a o imaginární teplotu. Měrná tepelná vodivost mědi je $\lambda_{Cu} = 385 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (viz příloha 1).

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_c \cdot O_{VP}}{\lambda_{Cu} \cdot S}} = 0,32575 \cdot \sqrt{\frac{13,7 \cdot 0,05363}{385 \cdot 10^{-4}}} = 1,423$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_c \cdot O_{VP} \cdot \lambda_{Cu} \cdot S} = \sqrt{13,7 \cdot 0,05363 \cdot 385 \cdot 10^{-4}} = 0,1682$$

Podélný tepelný odpor:

$$R_{Tlpř} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(1,423)}{0,1682} = \mathbf{11,6 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Příčný tepelný odpor:

$$R_{Ttř} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,1682 \cdot \tanh\left(\frac{1,423}{2}\right)} = \mathbf{9,7 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Imaginární teplota:

$$\theta_{př} = \frac{R_P \cdot I^2}{\alpha_c \cdot P_P} = \frac{6,96 \cdot 10^{-5} \cdot 300^2}{13,7 \cdot 0,01747} = \mathbf{26,2 \text{ K}}$$

5.1.11 Části neprotékané proudem – chladič za trubkou

Pro výpočet tepelného odporu části neprotékané proudem potřebujeme znát její povrch:

$$\begin{aligned} P_{CHpřKS} &= [(163,25 \cdot 25) \cdot 2 + (163,25 \cdot 4) + (25 \cdot 4) - (42 \cdot 25)] \cdot 10^{-6} \cdot 1,05 = \\ &= 8,259 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

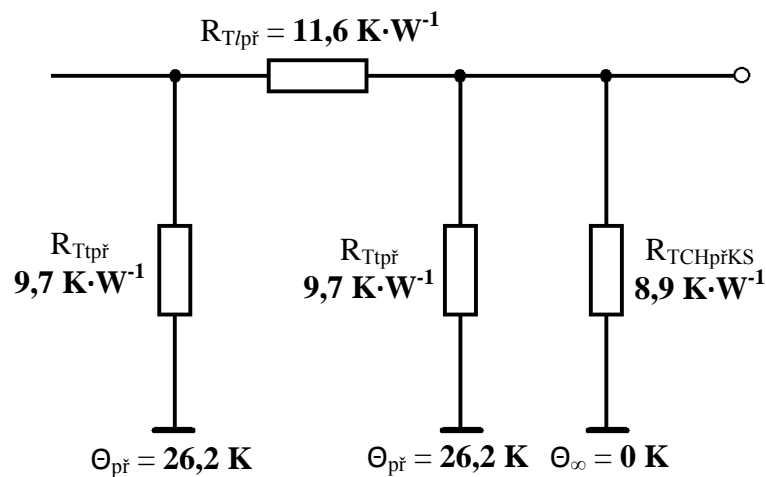
Chladihost odpovídá chladihosti přívodu:

$$\alpha_{cCHpřKS} = \alpha_c = 13,7 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

Tepelný odpor chladicí části potom bude:

$$R_{TCHpřKS} = \frac{1}{\alpha_c \cdot P_{CHpřKS}} = \frac{1}{13,7 \cdot 8,259 \cdot 10^{-3}} = 8,9 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

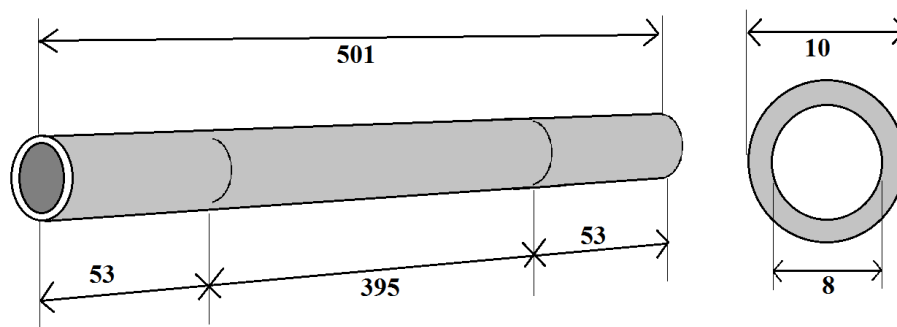
5.1.12 Náhradní tepelné schéma přívodního vodiče



Obr. 5. 3: Náhradní tepelné schéma přívodního vodiče

5.2 Výpočet oteplení trubky

Na trubce nejsou žádné díry či zúžení, proto nebudeme počítat koeficienty zhuštění proudnic. Vliv skinefektu je stejně jako v případě přívodních pasů zanedbatelný, uvažujeme proto $K_S=1$.



Obr. 5. 4: Rozměry trubky



5.2.1 Přepočítání měrného odporu na předpokládanou teplotu

Předpokládané oteplení $\Theta = 150 \text{ K}$

Rezistivita mědi při 20 °C $\rho_{Cu20} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$

Teplotní součinitel mědi $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$

$$\rho_{Cu70} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 150) = 2,688 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

5.2.2 Určení střední délky proudovodné dráhy v trubce

Střední délku proudovodné dráhy získáme z obrázku 5. 4:

$$l = 395 \text{ mm}$$

5.2.3 Výpočet elektrického odporu trubky

$$R_{tr} = \frac{\rho_{Cu}}{S} \cdot l = \frac{2,688 \cdot 10^{-8}}{28,27 \cdot 10^{-6}} \cdot 395 \cdot 10^{-3} = 3,756 \cdot 10^{-4} \Omega$$

5.2.4 Určení náhradní chladivosti povrchu

a) Chladivost zářením (viz kapitola 5.1.7)

$$\begin{aligned} \alpha_Z &= 0,8 \cdot \left[\left(5,6 - 2,6 \cdot \frac{0,08}{0,4} \right) - 0,2 \cdot 4 + \left[\left(0,034 - 0,017 \cdot \frac{0,08}{0,4} \right) - 0,001 \cdot 4 \right] \cdot 150 \right] \\ &= 6,62 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

b) Chladivost prouděním

Vztah pro kulatinu šíře 10 mm: [[9], str. 52, tab. 2-44]

$$\alpha_{K10} = 6 + 0,090 \cdot \Theta = 6 + 0,090 \cdot 150 = 19,5 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková chladivost

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 6,62 + 19,5 = 26,12 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$



5.2.5 Výpočet chladicí plochy

$$P_p = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{vnější}} \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 395 \cdot 10^{-6} = \mathbf{0,01241 \text{ m}^2}$$

5.2.6 Výpočet velikosti chladicího obvodu

$$O_{VP} = \frac{P_p}{l} = \frac{0,01241}{0,395} = \mathbf{0,0314 \text{ m}}$$

5.2.7 Veličiny náhradního Π -článku trubky

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_c \cdot O_{VP}}{\lambda_{Cu} \cdot S}} = 0,395 \cdot \sqrt{\frac{26,12 \cdot 0,0314}{385 \cdot 28,27 \cdot 10^{-6}}} = 3,429$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_c \cdot O_{VP} \cdot \lambda_{Cu} \cdot S} = \sqrt{26,12 \cdot 0,0314 \cdot 385 \cdot 28,27 \cdot 10^{-6}} = 0,0945$$

Podélný tepelný odpor:

$$R_{Tl} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(3,429)}{0,0945} = \mathbf{163 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Příčný tepelný odpor:

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,0945 \cdot \tanh\left(\frac{3,429}{2}\right)} = \mathbf{11,3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Imaginární teplota okolí:

$$\theta_t = \frac{R_p \cdot I^2}{\alpha_c \cdot P_p} = \frac{2,817 \cdot 10^{-4} \cdot 300^2}{26,12 \cdot 0,01241} = \mathbf{78,2 \text{ K}}$$

5.2.8 Konce trubky neprotékané proudem = chladič

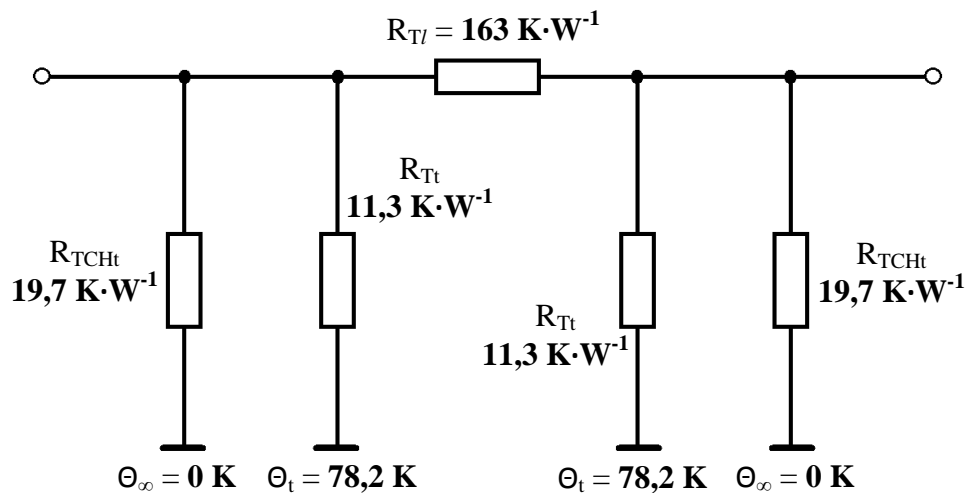
Nesmíme opomenout krajní části trubky mimo proudovodnou dráhu, které v náhradním obvodu představují chladiče. Oba konce jsou identické, výpočet proto stačí provést pouze jednou:

$$\begin{aligned}
 P_{CHt} &= 2 \cdot \pi \cdot r_{vnější} \cdot l_{CH} + (\pi \cdot r_{vnější}^2 - \pi \cdot r_{vnitřní}^2) + 2 \cdot \pi \cdot r_{vnitřní} \cdot l_{CH1cm} = \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 53 \cdot 10^{-3} + (\pi \cdot 5^2 - \pi \cdot 4^2) \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} \\
 &= 1,945 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

$$\alpha_{cCHt} = \alpha_c = 26,12 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_{TCHt} = \frac{1}{\alpha_c \cdot P_{CH}} = \frac{1}{26,12 \cdot 1,945 \cdot 10^{-3}} = 19,7 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

5.2.9 Náhradní tepelné schéma trubky



Obr. 5. 5: Náhradní tepelné schéma trubky



5.3 Výpočet oteplení krajního přívodního vodiče

Jako krajní vodiče byly použity pasy ze stejného materiálu i stejného průřezu, jako v případě přívodního vodiče. Tyto krajní vodiče uvažujeme jako tepelně dlouhé tyče s nenulovou hodnotou oteplení na jejich konci. Pro zjednodušení výpočtu u krajního vodiče neuvažujeme žádné díry či zúžení, proto nebudeme počítat koeficienty zhuštění proudnic. Vliv skin efektu je stejně jako v případě přívodních pasů zanedbatelný, uvažujeme proto $K_S=1$. Počítáme pro oteplení 40 K.

5.3.1 Délka proudovodné dráhy

Uvažovaná délka proudovodné dráhy v krajním přívodním vodiči je $l_K = 500$ mm. Pro delší vzdálenosti již předpokládáme zanedbatelný vliv oteplení.

5.3.2 Přepoččet rezistivity mědi pro oteplení 40 K

$$\rho_{Cu60} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 40) = \mathbf{1,949 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m^{-1}}$$

5.3.3 Plocha chlazení

Obvod vodiče:

$$O_{KCu} = 25 \cdot 2 + 4 \cdot 2 = 58 \text{ mm}$$

Plocha chlazení:

$$P_K = O_{KCu} \cdot l_K = 0,058 \cdot 0,5 = \mathbf{0,029 \text{ m}^2}$$

5.3.4 Určení náhradní chladiivosti povrchu

a) Chladiivost zářením (viz kapitola 5. 1. 7)

$$\begin{aligned} \alpha_Z &= 0,8 \cdot \left[\left(5,6 - 2,6 \cdot \frac{0,08}{0,4} \right) - 0,2 \cdot 4 + \left[\left(0,034 - 0,017 \cdot \frac{0,08}{0,4} \right) - 0,001 \cdot 4 \right] \cdot 40 \right] = \\ &= 4,28 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

b) Chladihost prouděním

Pro výpočet chladihosti prouděním krajního přívodního vodiče použijeme stejné vzorce, jako při výpočtu přívodního vodiče, neboť pro něj byla užitá stejná pásovina šíře 25 mm.

$$\alpha_K = \left(4,3 + \frac{6-4,3}{8} \cdot 5\right) + \left(0,055 + \frac{0,09-0,055}{8} \cdot 5\right) \cdot 40 = 5,41 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

c) Celková chladihost

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 4,28 + 5,41 = 9,69 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

5.3.5 Nominální průřez přívodu

$$S_{Cu} = 4 \cdot 25 = 100 \text{ mm}^2$$

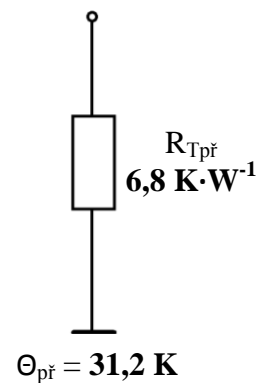
5.3.6 Veličiny náhradního π -článku krajního přívodního vodiče

$$\delta_{Cu} = \sqrt{\alpha_C \cdot O_{KCu} \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}} = \sqrt{9,69 \cdot 0,058 \cdot 385 \cdot 10^{-4}} = 0,1471$$

$$R_{Tpř} = \frac{1}{\delta_{Cu}} = \frac{1}{0,1471} = 6,8 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

$$\Theta_{př} = \frac{\rho_{Cu60} \cdot I^2}{\alpha_C \cdot O_{KCu} \cdot S_{Cu}} = \frac{1,949 \cdot 10^{-8} \cdot 300^2}{9,69 \cdot 0,058 \cdot 10^{-4}} = 31,2 \text{ K}$$

5.3.7 Dílčí část pro tepelné schéma



Obr. 5. 6: Náhradní tepelné schéma pro přívod

5.4 Výpočet oteplení pracovního kontaktního styku

U počítaného styku je při $\alpha = 3^\circ$ a $I = 300$ A přítláčná síla $F_P = 0,054$ N. (viz příloha 2). Oteplení kontaktního styku budeme předpokládat $\Theta = 150$ K.

5.4.1 Výpočet elektrického odporu ve styku

Uvažujeme bodový styk ($n = 0,5$):

$$R_{KS} = k_{Cu} \cdot F_P^{-n} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,054^{-0,5} = \mathbf{0,0034 \Omega}$$

5.4.2 Rezistivita Cu při oteplení o 150 K

$$\rho_{Cu150} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 150) = \mathbf{2,688 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m^{-1}}$$

5.4.3 Výpočet tepelného odporu ve styku

Určení koeficientu přestupu tepla mezerou v okolí kont. plošek: [[9] str. 61, 2-58]

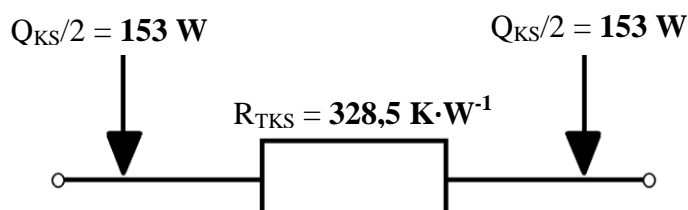
$$c = 1$$

$$R_{TKS} = \frac{c \cdot R_{KS}}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{1 \cdot 0,0034}{385 \cdot 2,688 \cdot 10^{-8}} = \mathbf{328,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

5.4.4 Výpočet tepelných ztrát ve styku

$$Q_{KS} = R_{KS} \cdot I^2 = 0,0034 \cdot 300^2 = \mathbf{306 \text{ W}}$$

5.4.5 Dílčí část pro tepelné schéma



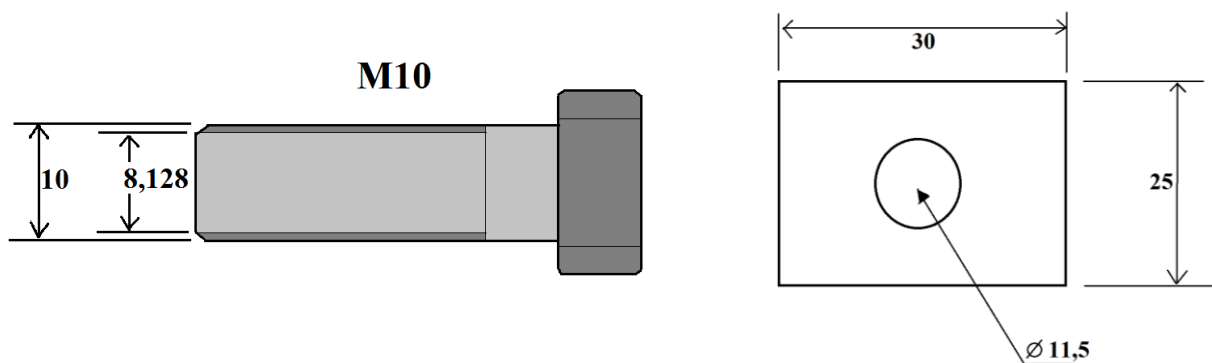
Obr. 5. 7: Náhradní tepelné schéma pro kontaktní styk

5.5 Výpočet oteplení šroubového styku

5.5.1 Výpočet přítláčné síly

Styk je spojen šroubením M10. Dle normy je průměr jádra šroubu M10 je $d_j = 8,128$ mm. Při dovoleném namáhání $\sigma_d = 30$ MPa vyvíjí tento šroub sílu ([9] str. 127):

$$F_{\xi 10} = \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 0,008128^2}{4} \cdot 30 \cdot 10^6 = 1556,6 \text{ N}$$



Obr. 5. 8: Rozměry šroubu a styčné plochy

Vlivem ochlazování a ohřívání šroubu a styčných ploch při průtoku el. proudu předpokládáme snížení přítláčné síly o cca 50 % odtáčením. Tato síla tak poté bude:

$$F_{\xi 1} = 0,5 \cdot 1556,6 = 778,3 \doteq \mathbf{780 \text{ N}}$$

5.5.2 Výpočet elektrického odporu ve šroubovém styku

Uvažujeme plošný styk ($n = 1$)

$$R_{\xi} = k_{Cu} \cdot F_{\xi 1}^{-n} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 780^{-1} = \mathbf{1,026 \cdot 10^{-6} \Omega}$$

5.5.3 Výpočet tepelného odporu ve styku

Pro určení koeficientu přestupu tepla mezerou v okolí kont. plošek c je nejprve potřeba určit styčnou plochu. Poté z tabulky odečteme koeficient přestupu tepla [[9] str. 61, 2-58]:

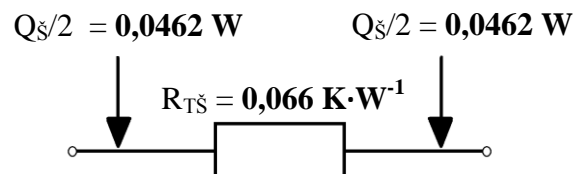
$$S_{st} = \left(0,025 \cdot 0,030 - \frac{\pi \cdot 0,0115^2}{4} \right) = 6,46 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \rightarrow \quad \mathbf{c = 0,5}$$

$$R_{T\check{s}} = \frac{C \cdot R_{\check{s}}}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,5 \cdot 1,026 \cdot 10^{-6}}{385 \cdot 2,016 \cdot 10^{-8}} = \mathbf{0,066 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

5.5.4 Výpočet tepelných ztrát ve šroubovém styku

$$Q_{\check{s}} = R_{\check{s}} \cdot I^2 = 1,026 \cdot 10^{-6} \cdot 300^2 = \mathbf{0,0924 \text{ W}}$$

5.5.5 Náhradní tepelné schéma pro šroubový styk

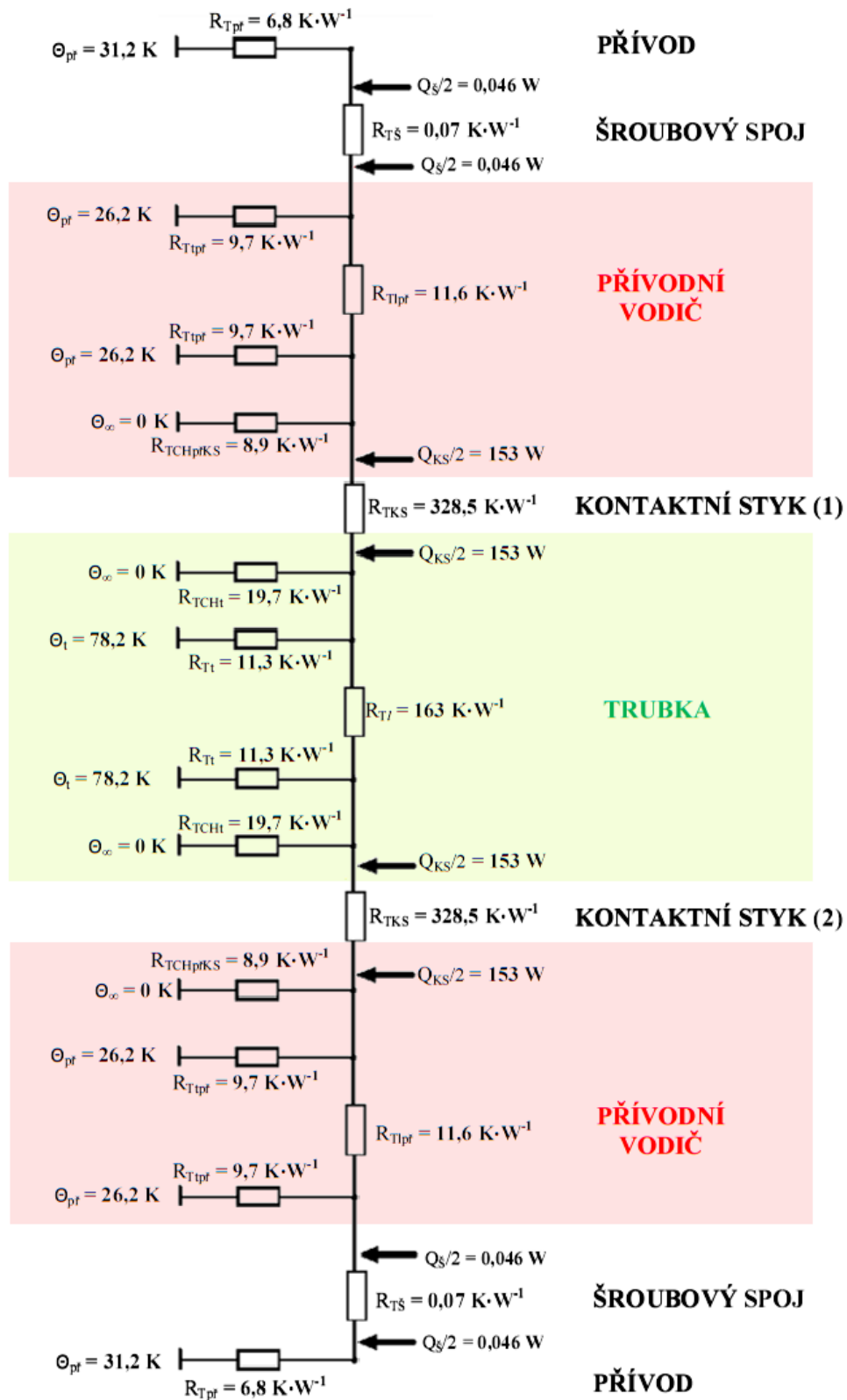


Obr. 5. 9: Náhradní tepelné schéma pro šroubový styk

5.6 Výsledné tepelné schéma

Výsledné schéma vytvoříme propojením všech dílčích komponentů tak, jak ve skutečnosti jdou za sebou. Celé schéma je pak znázorněno na obrázku 5. 10.

1. Přívod
2. Šroubový spoj
3. Přívodní vodič
4. Kontaktní styk (1)
5. Trubka
6. Kontaktní styk (2)
7. Přívodní vodič
8. Šroubový spoj
9. Přívod



Obr. 5. 10: Celé náhradní tepelné schéma přípravku



5.7 Vyhodnocení teoretického výpočtu

Na tepelném schématu lze pozorovat základní děje a souvislosti. Šipky představují místo s produkcí tepelného (ztrátového) výkonu, rezistory zastupují tepelný odpor a uzemněné konce přestup tepla z materiálu do okolního prostředí.

Zatímco v kontaktním styku se snažíme vytvořit co nejhorší podmínky slabou přitlačnou silou, šroubový spoj má poměrně blízko k dokonalému spoji. Je proto logické, že v náhradním tepelném schématu jsou hodnoty tepelného výkonu i tepelného odporu v pracovním kontaktu mnohonásobně větší (až o čtyři řády) než ve spoji šroubovém. První zákon termodynamiky praví, že teplo přirozeně postupuje z teplejšího místa do místa chladnějšího. Tomu ovšem může bránit tepelný odpor – čím vyšší je, tím hůře a pomaleji se teplo přenáší. Jak je opět vidno na schématu, nejnanežněji může teplo ze soustavy unikat cestou přes odpory $R_{TCHpřKS}$ a R_{TCHt} , tedy přes konce neprotékané proudem – chladiče. Za pozornost stojí i tepelný odpor trubky samotné. Trubka se ve srovnání se zbytkem soustavy chová jako relativně špatný vodič tepla i proudu, což je způsobeno zejména velikostí průřezu. Menší průřez má totiž za následek nárůst proudové hustoty oproti přívodům. Tedy volná trubka napomáhá žádanému ohřevu kontaktů v přípravku, aby bylo možné sledovat kritické jevy v pracovních kontaktních stycích.

Matematický model nám potvrdil předpoklady o nežádoucí tepelné vodivosti z kontaktů do proudem neprotékaných konců přípravku a volné proudem neprotékané části roury, jinými slovy nežádoucím chlazením. Přípravek jsme proto upravili, jak popisuje následující kapitola.

6 MĚŘENÍ OTEPLENÍ KONTAKTŮ PO ÚPRAVĚ PŘÍPRAVKU

6.1 Popis úpravy laboratorního přípravku

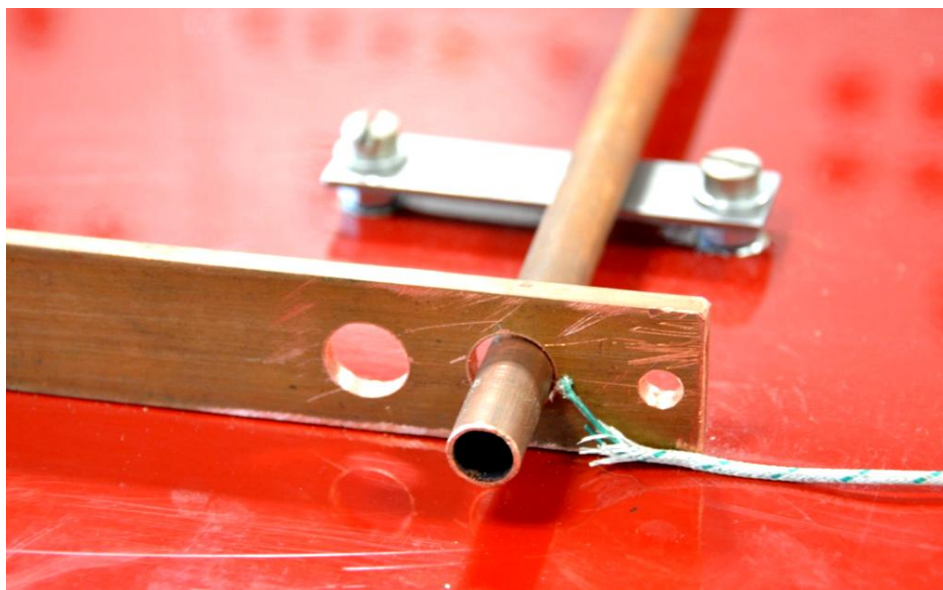
Základní úprava přípravku spočívala ve zmenšení chladících ploch neprotékaných proudem, tj. zkrácení měděné trubky na každém konci o 3 cm a úpravou přívodních pasů. Byla změněna pozice otvorů pro trubku a neprotékaná část pásoviny za tímto otvorem byla výrazně zkrácena. 2 cm před kontaktním otvorem byla vytvořena ještě další díra stejného průměru, od níž se dle teorie očekává snížení podélné tepelné vodivosti z kontaktního styku přípravku, tedy omezení úniku tepla do přípojníc. Dodatečnou úpravou pak prošlo i uchycení přívodních pasů k základní desce a byl zdokonalen systém nastavování výšky pozice trubky pomocí kolejniček.

Vlivem úpravy přípravku došlo i ke změně některých parametrů majících vliv, byť poměrně malý, na výslednou přítlačnou sílu. Je proto nutné příslušné části výpočtů modifikovat se dle těchto změn:

- délka přívodních vodičů protékaných proudem $h = 1311 \text{ mm}$
- délka trubky $d_{\text{trubky}} = 441 \text{ mm}$

Délka přívodních vodičů má vliv na elektrodynamické síly na dně U-smyčky. Již při prvním výpočtu jsme si však dokázali, že při těchto rozměrech smyčky již lze elektrodynamické síly počítat dle zjednodušeného vztahu pro nekonečně dlouhé přívodní vodiče. Po úpravě laboratorního přípravku se skutečná délka přívodů oproti původnímu stavu zvětšila, chyba vzniklá zjednodušeným výpočtem proto bude dokonce ještě menší.

Zmenšení hmotnosti trubky důsledkem jejího zkrácení má však již přímý vliv na přítlačnou sílu kontaktů, čímž je změněn stykový odpor.



Obr. 6. 1: Detail upraveného přípravku – kontakt.

6.2 Teoretický výpočet přitlačné síly kontaktů

6.2.1 Výpočet tíhové síly

Objem zakrácené trubky:

$$V_{\text{trubky}} = d \cdot (\pi \cdot r_{\text{vnější}}^2 - \pi \cdot r_{\text{vnitřní}}^2) = 441 \cdot (\pi \cdot 5^2 - \pi \cdot 4^2) \doteq 12,469 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Hmotnost zakrácené trubky:

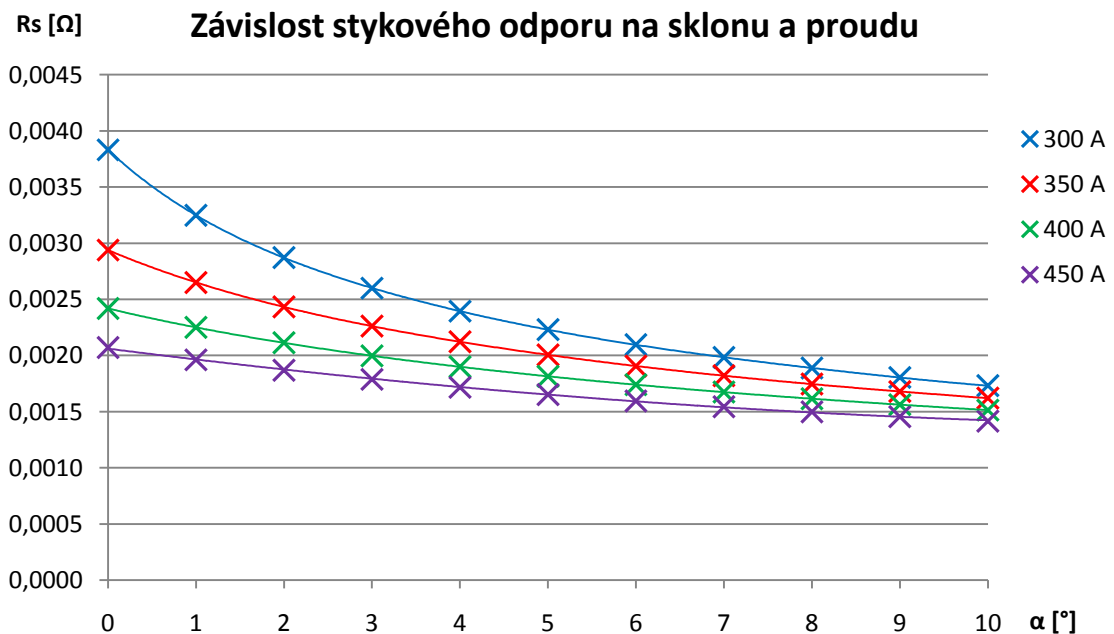
$$m_{\text{trubky}} = V_{\text{trubky}} \cdot \rho_{\text{Cu}} = 12,469 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 \doteq 0,11172 \text{ kg}$$

Tíhová síla trubky na jeden kontakt:

$$F_g = \frac{m_{\text{trubky}}}{2} \cdot g = \frac{0,11172}{2} \cdot 9,8128 = 0,5482 \text{ N}$$

6.2.2 Výpočet stykového odporu

Výpočet stykového odporu dle rovnice (34) jsme opět provedli pro čtyři velikosti proudů (300 – 450 A) a pro rozsah úhlu naklonění 0° – 10°. Výsledky výpočtů shrnuje tabulka v příloze 4 a též grafické zobrazení závislosti stykového odporu na úhlu a proudu v obrázku 6. 2.

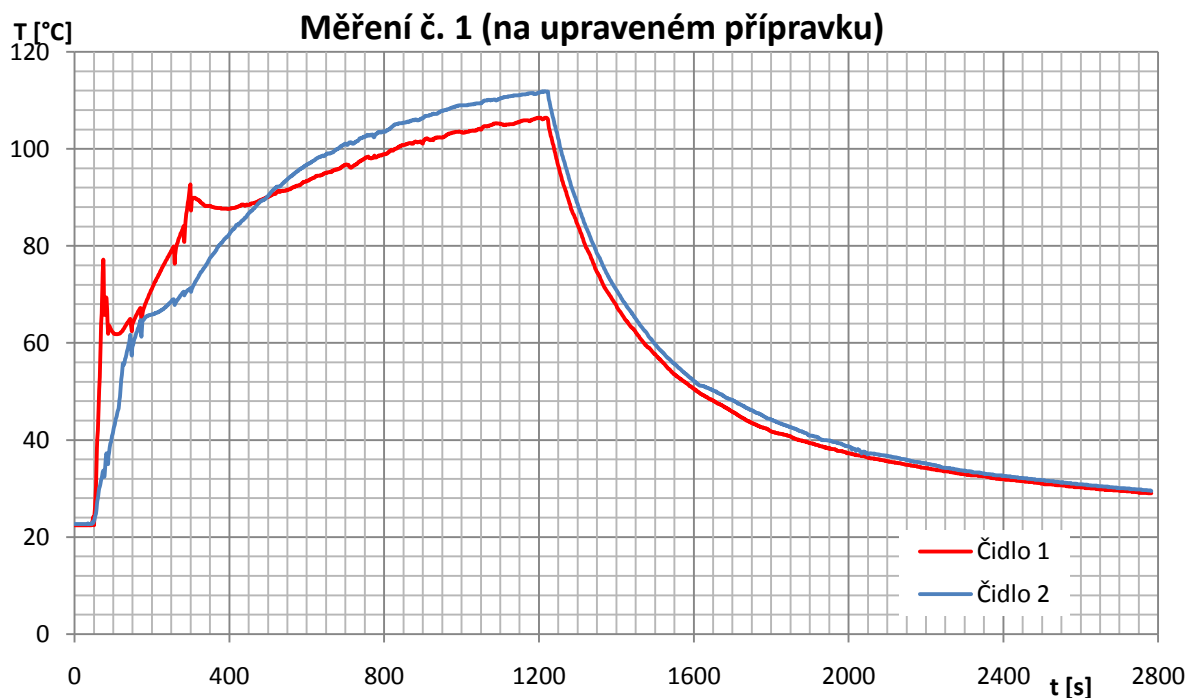


Obr. 6. 2 – Graf závislosti stykového odporu na úhlu sklonu a proudu po úpravě přípravku.

6.3 Měření oteplovací charakteristiky

Na upraveném přípravku jsme provedli novou sérii měření a opět jsme pro každé z měření měnili vstupní parametry (nastavení proudu a úhlu α). Ze tří experimentů jsme pro názornost vybrali první z nich, neboť měl oba parametry shodné s původním vzorkem ($I = 300$ A, $\alpha = 2,5^\circ$). Oteplovací charakteristiky zbylých měření jsou uvedeny v příloze 5.

Měření vybraného případu trvalo 46 minut, přičemž proud přípravkem protékal prvních 20 minut. Grafický průběh celého měření znázorňuje obrázek 6. 3, obrázek 6. 4 je pak detailem konkávní části tohoto průběhu.

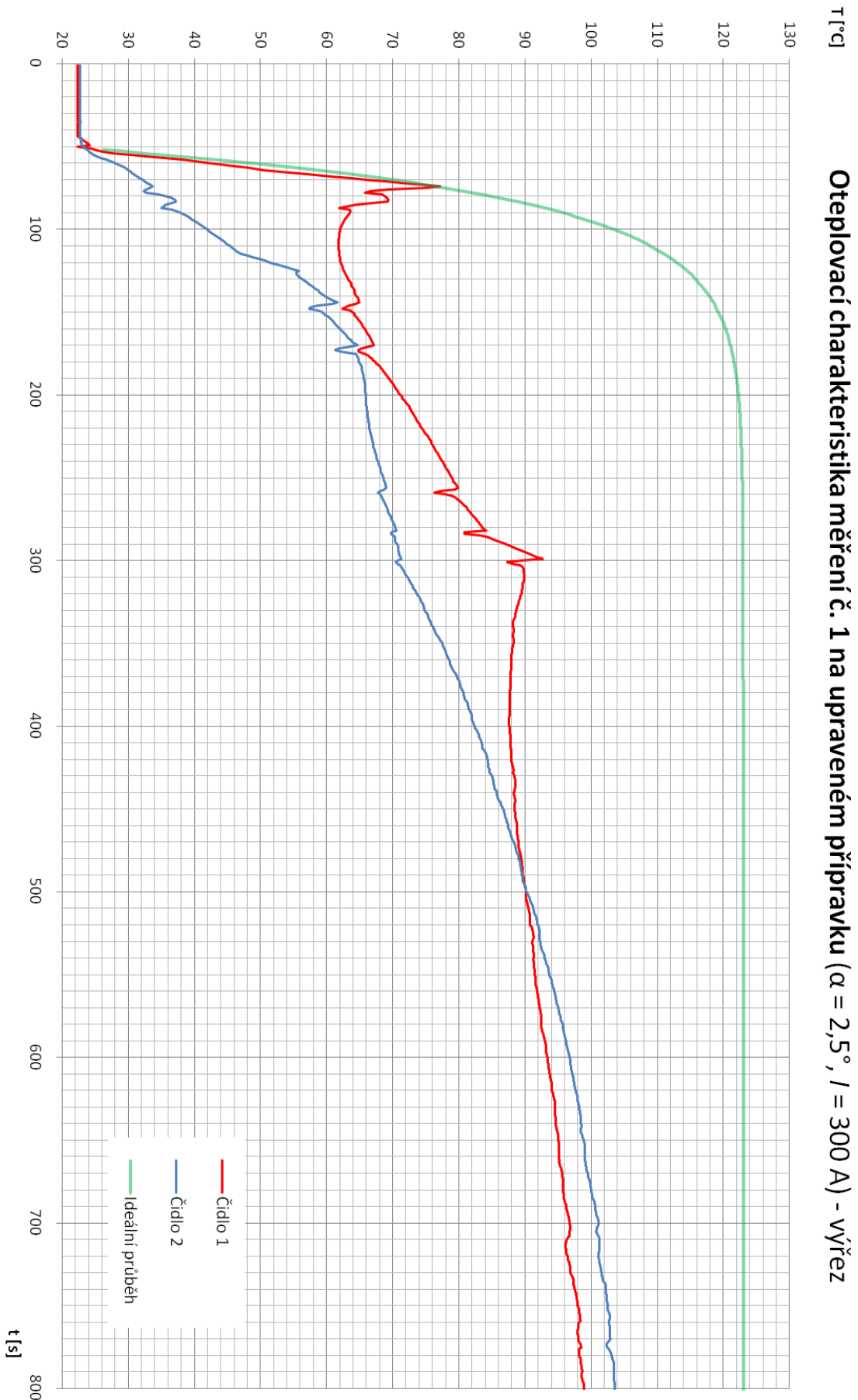


Obr. 6. 3: Průběh oteplovací charakteristiky celého měření č. 1

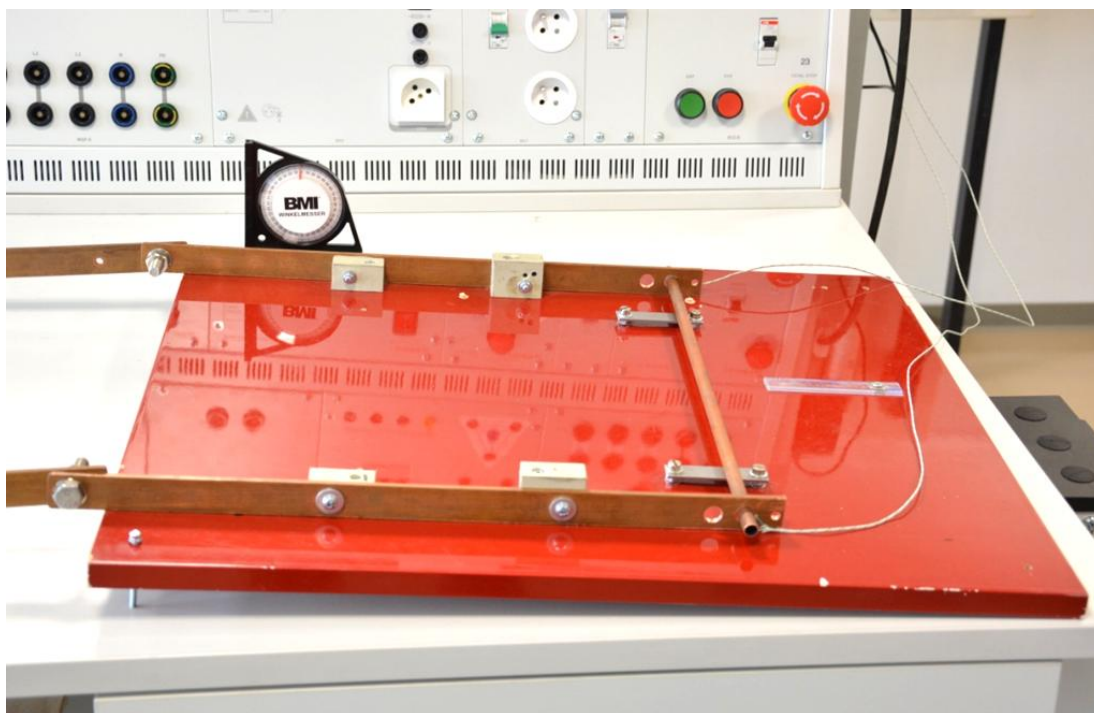
6.3.1 Teoretický průběh

Pro zakreslení předpokládaného ideálního průběhu do charakteristiky (obr. 5. 3) je potřeba z lineární části grafu opět určit časovou konstantu. Zvolený bod na lineární části má nyní souřadnice $t=24$ s pro oteplení $\vartheta=54,4$ K. Maximální oteplení zvolíme opět $\vartheta_{max}=100^\circ\text{C}$. Časová konstanta poté bude:

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{max}}\right)} = \frac{-24}{\ln\left(1 - \frac{54,4}{100}\right)} \doteq 30,5 \text{ s}$$



Obr. 6. 4: Průběh oteplovací charakteristiky části měření č. 1 pod proudem



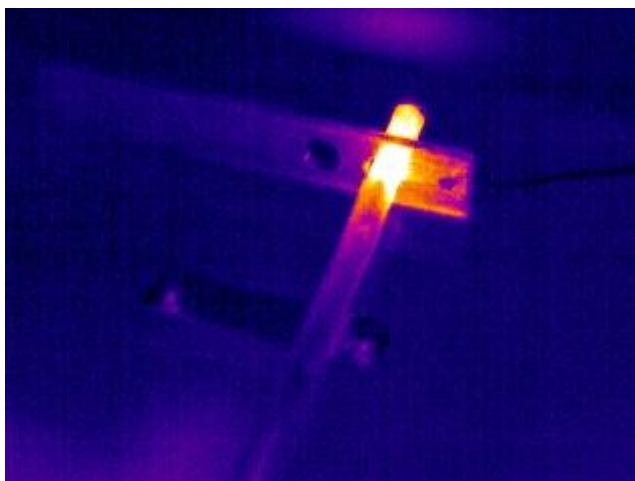
Obr. 6. 5: Upravený přípravek – celkový pohled

Skutečný průběh - vyhodnocení

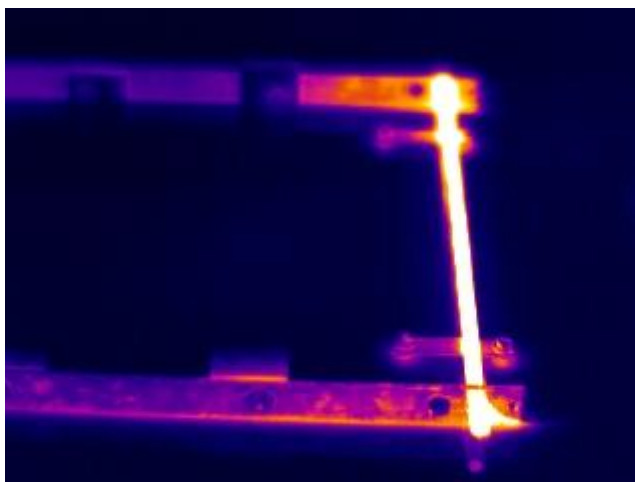
Úprava přípravku zmenšením tepelných kapacit v blízkosti styku přinesla pozitivní a žádané změny v podobě zmenšení časové konstanty a zvětšení maximálního oteplení. Přínosem je tedy rychlejší nárůst teploty v kontaktech a experiment proto stačí měřit kratší dobu. Porovnáním průběhů v obr. 6. 4 a 4. 5 lze sledovat, že za stejný časový úsek (800 s) teplota čidel na upraveném přípravku narostla o cca 30 K více než na původním; upravenému přípravku pro získání stejného oteplení stačí čtvrtinová doba oproti původnímu.

Na možnosti pozorování jevů se však nic nezměnilo. Stále lze na vykreslené charakteristice (obr. 6. 4) rozeznat okamžiky odskoků (například v časech 70, 80, 145, 170 s), měknutí (v časech 90 a 310 s) a lepení (v čase 175 s). Úkaz lepení je zřetelný i na začátku měření (od $t = 50$ s), kdy přilepení kontaktu 2 způsobilo výraznější produkci ztrát (tepla) v kontaktu 1. Nestejné podmínky v obou stycích panují i ve zbytku průběhů a vždy mají za následek různé oteplení. V čase 500 s dokonce teplota detekovaná čidlem 2 překonala teplotu ve styku 1.

Přestože fotografie pořízené termokamerou nelze využívat k přesnému určení teplot, slouží nám pro názornou demonstraci vzniku a pohybu tepla. Obr. 6. 6 byl pořízen asi 20 sekund po zahájení experimentu a potvrzuje, že místo s největší produkcí tepelných ztrát se nachází v pracovním styku. Obr. 6. 7 představuje přípravek v již pokročilé fázi měření, kdy se teplo šíří do trubky i přípojnic. Po jeho srovnání s obrázkem 4. 6 lze provedené úpravy prohlásit za účinné. Pro plnohodnotnou názornost jsme ještě v následující kapitole přepočítali náhradní tepelné schéma (viz kapitola 7).



Obr. 6. 6: Detail kontaktu krátce po spuštění experimentu pořízený termokamerou



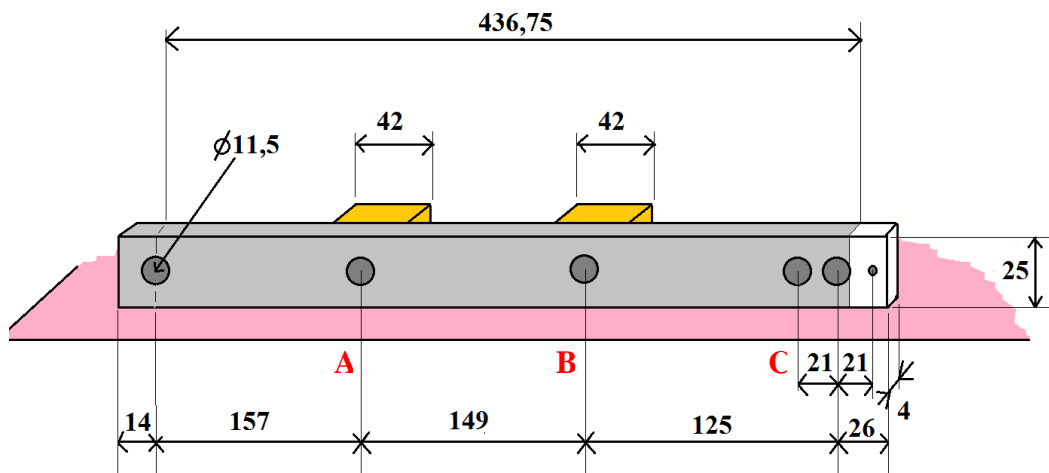
Obr. 6. 7: Šíření tepla přípravkem v průběhu experimentu (foceno termokamerou)

7 TEORETICKÝ VÝPOČET OTEPLENÍ PO ÚPRAVĚ PŘÍPRAVKU

Provedené úpravy laboratorního přípravku se promítly i do náhradního tepelného schématu. Abychom mohli obě schémata (před a po úpravě přípravku) porovnat, je nejprve nutno upravené komponenty znovu přepočítat. To se týká konců trubky, kontaktního styku a přívodního vodiče.

7.1 Přepočet oteplení přívodního vodiče

Největších změn doznal přívodní vodič. Změnily se geometrické proporce pasu, poloha a počet otvorů se zvětšil na tři (na obr. 7. 1 označené písmeny A-C).



Obr. 7. 1: Rozměry přívodního vodiče po provedené úpravě

7.1.1 Přepočet měrného odporu pro oteplení 50 K

Předpokládané oteplení $\theta = 50 \text{ K}$

Rezistivita mědi při 20 °C $\rho_{Cu20} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$

Teplotní součinitel mědi $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$

$$\rho_{Cu70} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 50) = 2,016 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

7.1.2 Určení koeficientu zhuštění proudnic

Koeficienty zhuštění proudnic kolem děr se oproti původnímu stavu nezmění. Nesmíme však zapomenout na nově vzniklou třetí díru, koeficienty proto budou tři.

$$K_2 = K_3 = K_1 = 1,67$$



7.1.3 Výpočet střední délky proudovodné dráhy v přívodním vodiči

$$l = 157 + 149 + 125 + 11,5 / 2 = \mathbf{436,75 \text{ mm}}$$

7.1.4 Výpočet elektrického odporu přívodu

$$R_P = \frac{\rho_{Cu}}{S} \cdot [l + b \cdot (K_1 + K_2 - 2)] \cdot K_S$$

$$R_P = \frac{2,016 \cdot 10^{-8}}{10^{-4}} \cdot [0,43675 + 25 \cdot 10^{-3} (1,67 + 1,67 + 1,67 - 3)] \cdot 1 = \mathbf{9,82 \cdot 10^{-5} \Omega}$$

7.1.5 Určení náhradní chladivosti povrchu

Chladivost povrchu vypočítáme stejně jako v případě přípravku před změnou rozměrů, na nichž chladivost nezávisí. Emisivitu stále uvažujeme $E_Z = 0,72$ a činitel stínění $N = 0,8$. Celková chladivost se proto nezmění:

$$\alpha_C = \mathbf{13,70 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}}$$

7.1.6 Výpočet chladicí plochy

$$P_P = ((436,75 \cdot 25) \cdot 2 + (436,75 \cdot 4) + (25 \cdot 4) - 2 \cdot (42 \cdot 25)) \cdot 10^{-6} \cdot 1,05 = \\ = \mathbf{22,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$$

7.1.7 Výpočet velikosti chladícího obvodu

$$O_{VP} = \frac{P_P}{l} = \frac{0,02266}{0,43675} = \mathbf{0,05188 \text{ m}}$$

7.1.8 Veličiny náhradního Π -článku přívodního vodiče

$$\beta l = l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_C \cdot O_{VP}}{\lambda_{Cu} \cdot S}} = 0,43675 \cdot \sqrt{\frac{13,7 \cdot 0,05188}{385 \cdot 10^{-4}}} = \mathbf{1,877}$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_c \cdot O_{VP} \cdot \lambda_{Cu} \cdot S} = \sqrt{13,7 \cdot 0,05188 \cdot 385 \cdot 10^{-4}} = 0,1654$$

Podélný tepelný odpor:

$$R_{Ttpř} = \frac{\sinh(\beta l)}{\delta} = \frac{\sinh(1,877)}{0,1654} = \mathbf{19,3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Příčný tepelný odpor:

$$R_{Ttpř} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)} = \frac{1}{0,1654 \cdot \tanh\left(\frac{1,877}{2}\right)} = \mathbf{8,2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Imaginární teplota okolí:

$$\Theta_{př} = \frac{R_P \cdot I^2}{\alpha_c \cdot P_P} = \frac{9,82 \cdot 10^{-5} \cdot 300^2}{13,7 \cdot 0,02266} = \mathbf{28,5 \text{ K}}$$

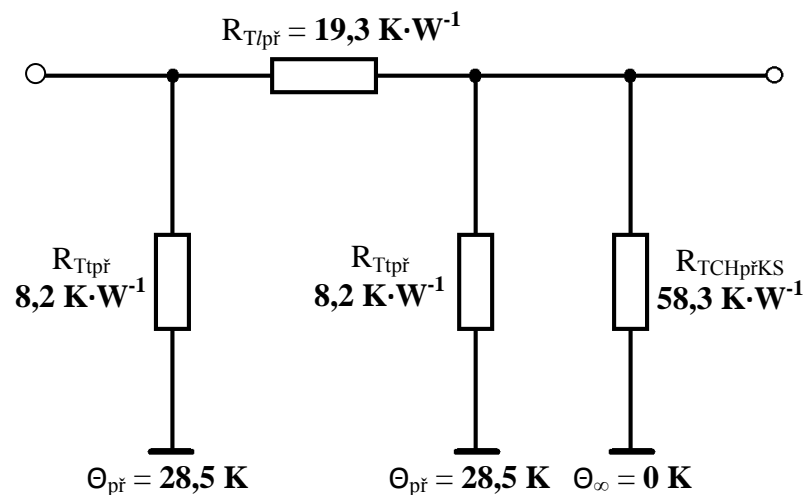
7.1.9 Části neprotékané proudem – chladič za trubkou

$$P_{CHpřKS} = [20,25 \cdot 25 \cdot 2 + (20,25 \cdot 4) + (25 \cdot 4)] \cdot 10^{-6} \cdot 1,05 = 1,253 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\alpha_{cCHpřKS} = \alpha_c = 13,7 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_{TCHpřKS} = \frac{1}{\alpha_c \cdot P_{CHpřKS}} = \frac{1}{13,7 \cdot 1,253 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{58,3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

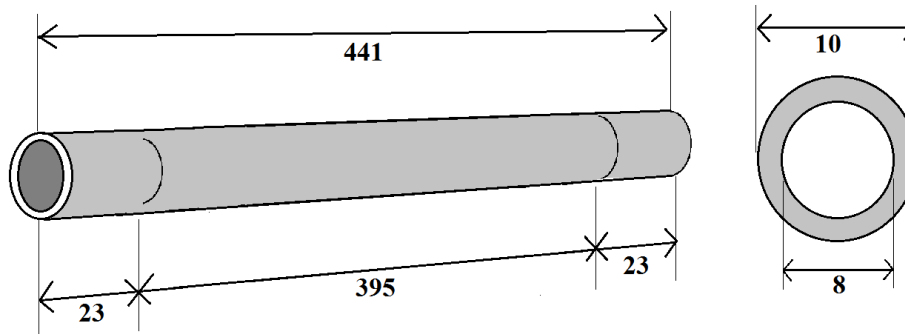
7.1.10 Přepočítané náhradní tepelné schéma přívodního pasu



Obr. 7. 2: Náhradní tepelné schéma přívodního vodiče po úpravě rozměrů

7.2 Přepočítání oteplení trubky

Trubka byla zakráčena, aby se na obou koncích zmenšily chladící plochy. Délka proudovodné dráhy však zůstala nezměněna, stačí proto přepočítat pouze části neprotékané proudem.



Obr. 7. 3: Rozměry trubky po úpravě přípravku

7.2.1 Přepočítání měrného odporu na oteplení 150 K

Předpokládané oteplení $\Theta = 150 \text{ K}$

Rezistivita mědi při 20 °C $\rho_{Cu20} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$

Teplotní součinitel mědi $\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$

$$\rho_{Cu70} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot 150) = 2,688 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

7.2.2 Konce upravené trubky neprotékané proudem = chladič

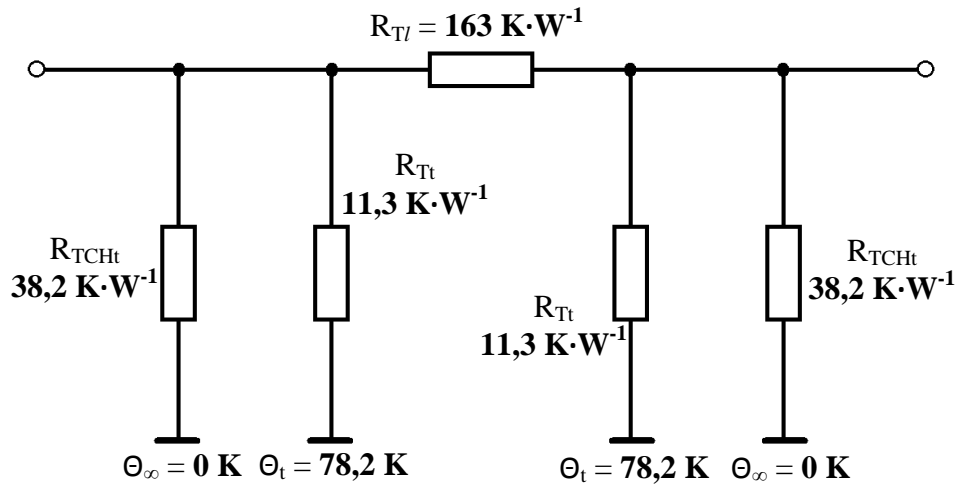
Oba konce jsou identické, opět proto stačí výpočet provést pouze jednou.

$$\begin{aligned} P_{CHt} &= 2 \cdot \pi \cdot r_{vnější} \cdot l_{CH} + (\pi \cdot r_{vnější}^2 - \pi \cdot r_{vnitřní}^2) + 2 \cdot \pi \cdot r_{vnitřní} \cdot l_{CH1cm} = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 23 \cdot 10^{-3} + (\pi \cdot 5^2 - \pi \cdot 4^2) \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} \\ &= 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\alpha_{cCHt} = \alpha_c = 26,12 \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$$

$$R_{TCHt} = \frac{1}{\alpha_c \cdot P_{CH}} = \frac{1}{26,12 \cdot 1,002 \cdot 10^{-3}} = 38,2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

7.2.3 Přepočítané náhradní tepelné schéma trubky



Obr. 7. 4: Náhradní tepelné schéma trubky po úpravě rozměrů

7.3 Přepočet oteplení pracovního kontaktního styku

Pro kontaktní styk je při $\alpha = 3^\circ$ a $I = 300$ A teoretická velikost přitlačné síly po úpravě přípravku $F_p = 0,053$ N (viz tabulka v příloze 4), což znamená, že oproti stavu před úpravou se zmenšila o 0,001 N.. Oteplení kontaktního styku budeme opět předpokládat $\Theta = 150$ K.

7.3.1 Výpočet elektrického odporu

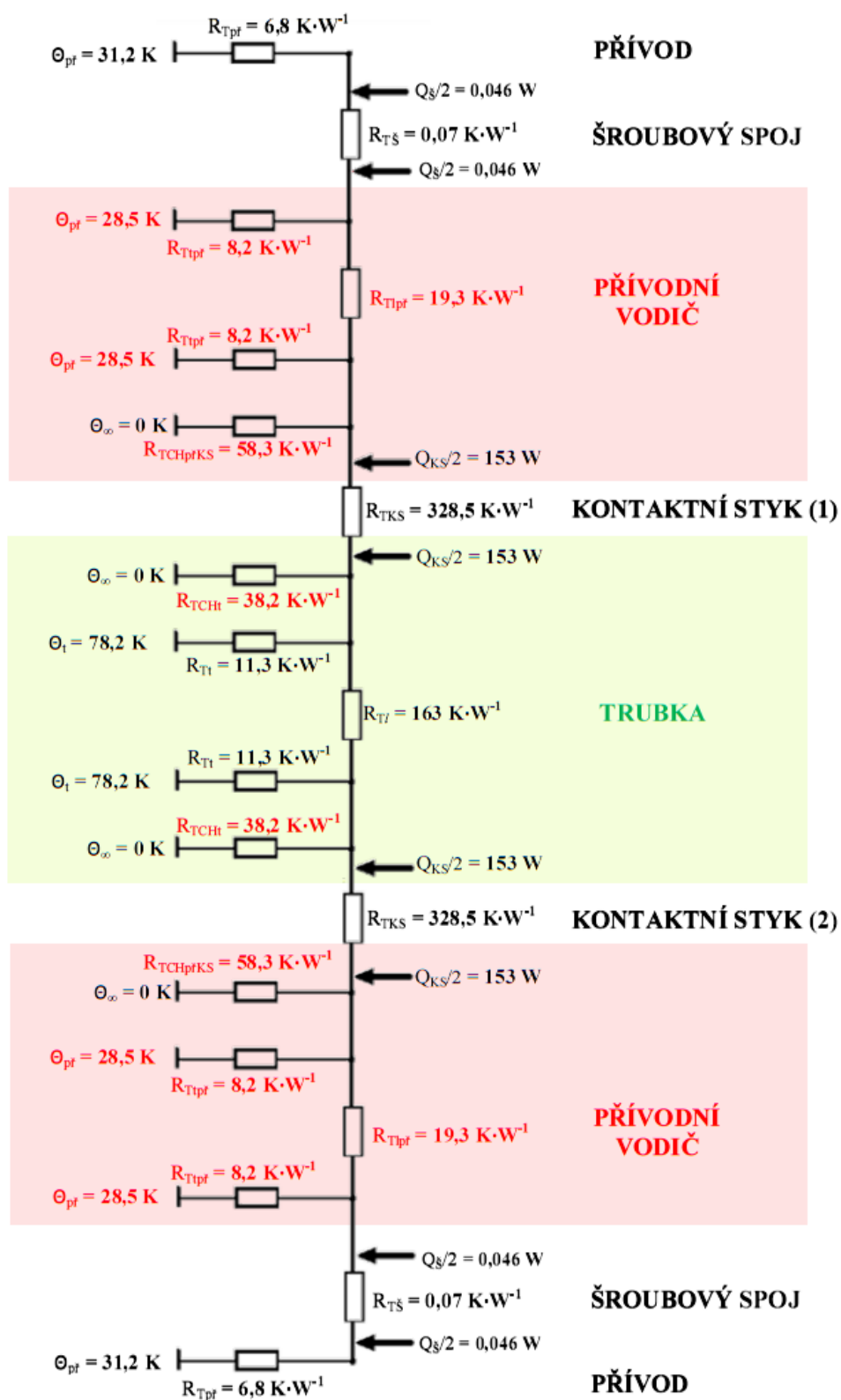
Uvažujeme bodový styk ($n = 0,5$)

$$R_{KS} = k_{Cu} \cdot F_p^{-n} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,053^{-0,5} = \mathbf{0,0034 \Omega}$$

Porovnáním s původní hodnotou elektrického odporu ve styku zjistíme, že hodnoty se rovnají. Úpravou rozměrů tudíž nedošlo vzhledem k pracovnímu styku k významným změnám a můžeme uvažovat původní hodnoty.

7.4 Výsledné náhradní tepelné schéma

Celé náhradní tepelné schéma upraveného přípravku získáme náhradou dílčích komponent přepočítanými hodnotami. Změny oproti původnímu přípravku jsou ve schématu (obr. 7. 5) vyznačeny červenou barvou.



Obr. 7. 5: Celé náhradní tepelné schéma upraveného přípravku



7.5 Vyhodnocení teoretického výpočtu

Upravené náhradní tepelné schéma nabízí při porovnání s původním schématem další důkaz vhodnosti provedených úprav, mající za cíl zmenšení chladících ploch. Tepelné odpory všech proudem neprotékaných konců (chladičů) se po jejich zkrácení významně zvětšily, čímž zhoršily podmínky pro únik tepla jejich prostřednictvím. U trubky bylo navýšení tepelného odporu přibližně dvojnásobné (z $19,7$ na $38,2 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$), zato na konci pasoviny tepelný odpor vzrostl téměř sedmkrát ($58,3$ oproti původním $8,9 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$). Změna ostatních parametrů přívodních vodičů souvisí s prodloužením proudovodné dráhy a jejími dalšími úpravami, na experiment však prakticky nemá vliv.



8 ZÁVĚR

Cílem práce na téma Působení elektrického proudu na kontaktní dvojici bylo seznámení se s problematikou kontaktního styku, s problémy, jež nastávají v kontaktní dvojici, a v konečné fázi provést měření průběhu oteplení dvojice elektrických kontaktů na předloženém laboratorním přípravku.

První dvě kapitoly (2 a 3) se věnují teoretickému rozboru problematiky. Nejprve jsou probírány účinky elektrického proudu obecně - elektrodynamické síly, vznik tepelných ztrát a s tím související oteplení materiálu. Také je nastíněna teorie vzniku a působení elektrických výbojů. Třetí kapitola se již detailněji zabývá kontaktní dvojicí. Jsou v ní uvedeny a vysvětleny základní požadavky na kontaktní dvojici a charakterizovány úžinový a přechodový stykový odpor kontaktů. Je popsána mechanická a tepelná odolnost a vypínací schopnost kontaktů. Dále jsou vypsány základní používané kontaktní materiály a definovány jejich fyzické a chemické vlastnosti. Hodnoty vybraných parametrů kovových prvků jsou uvedeny v příloze 1.

Ve čtvrté kapitole je popsán měřicí přípravek umožňující demonstraci dějů při oteplování kontaktů. Spolu s teoretickým výpočtem základních sil působících na kontaktní dvojici a určení přibližného stykového odporu je zhodnoceno i měření oteplovací charakteristiky pro danou konfiguraci kontaktní dvojice, na níž lze zřetelně sledovat různé jevy – odskoky, měknutí a lepení kontaktů. Pátá kapitola pak pro tutéž konfiguraci řeší výpočet náhradního tepelného schématu, sloužícího jako matematický model přípravku. Závěry obou kapitol se mimo jiné shodují v pozorování negativního vlivu hmot neprotékajících proudem na odvod tepla. Zvětšuje se tak totiž setrvačnost tepelných změn a zpomaluje celý experiment. Je proto uveden výčet navrhovaných úprav, jejichž realizací by došlo ke zlepšení vlastností přípravku pro další měření.

Šestá a sedmá kapitola řeší měření a teoretickou analýzu upraveného přípravku. Díky minimalizaci chladících ploch se o více než polovinu zmenšila časová konstanta oteplovací charakteristiky, čímž lze za kratší časový úsek dosáhnout vyšších teplot. Matematický model byl v sedmé kapitole přepočítán a představuje další důkaz o vhodnosti provedených změn. Jevy vznikající mezi kontakty však lze na průběhu oteplení sledovat ve stejném rozsahu jako na přípravku před úpravou.



LITERATURA

1. HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985.
2. BOUDA, Václav, Pavel MACH, Jiří PETR, Karel ŠTUPL. *Vlastnosti a technologie materiálů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00976-9.
3. ŠIMEK, D. *Výpočet a měření oteplení odpojovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 69 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.
4. ŠIMEK, D. *Návod k lab. úloze: Měření elektrodynamických sil a oteplení kontaktů* [online]. 2015 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/course/view.php?id=161784>
5. *Periodická tabulka – chemické prvky* [online]. © 2009-2015 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/>
6. KUSALA, Jaroslav. *Výboje v plynech – fyzikální vlastnosti* [online]. 2003 [cit. 2015-10-31]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz8.htm>
7. REICHL, Jaroslav, Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky – Síla pružnosti, normálové napětí* [online]. © 2006 - 2015 [cit. 2015-10-31]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/630-sila-pruznosti-normalove-napeti>
8. HELŠTÝN David, Petr KAČOR, Zdeněk HYTKA. *Elektrické přístroje spínací, ochranné a jistící*. Ostrava: Regionální centrum celoživotního vzdělávání, 2003. ISBN 80-248-0315-1.
9. HAVELKA, Otto, Zdeněk VÁVRA, Dalibor SVOBODA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů*. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno, 1985.



PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 - Elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti kovových prvků

Materiál	ρ [nΩ·m]	λ [W/m·K]	δ [kg/m ³]	c [MJ/m ³ ·K]	ϑ_m [°C]	ϑ_t [°C]	ϑ_v [°C]	U_{sm} [V]	U_{ss} [V]	E [GPa]	σ_p [MPa]
Ag	16	418	10500	2,45	150	961	2212	0,09	0,35	82	130-400
Cu	17	385	8960	3,46	190	1083	1595	0,12	0,43	125	160-490
Au	22	298	19320	2,51	100	1063	2966	0,08	0,45	79	100-300
Al	27	222	2700	2,44		660	2057			72	40-120
Rh	45	88	12440	3,08		966	4500			386	
Mg	45	160	1750	1,82		650	1110			45	110-220
Mo	52	147	10200	2,61	700	2625	4800	0,30	0,90	336	700-2800
Ir	53	59	22500	2,92		2454	5300			538	100-800
W	55	202	19300	2,59	900	3400	5900	0,40	1,00	415	300-1500
Zn	59	113	7140	2,76		420	906			94	20-190
Be	59	159	1820	3,96		1280	2970			293	
Co	62	67	8900	3,70		1495	2900			213	240-680
Cd	68	92	8650	2,09		321	765			64	85
Ni	68	92	8900	3,94	370	1455	2900	0,22	0,65	167	350-1700
Ru	76		12200	2,91		2500	4900			440	
In	84	25,2	7310	1,75		156	2000			11	
Cs	85		2250	2,94		2700	5500			570	
Fe	97	76	7870	3,64		1539	3000			215	180-620
Pt	98	71	21450	2,89	300	1773	4300	0,25	0,70	173	180-370
Pd	108	71	12000	2,93	300	1554	3980		0,57	124	380
Sn	115,5	67	7300	1,66		232	2270			55	25-70
Ta	124	55	16600	2,51		2980	4100			188	350-1200
Cr	130	67	7190	3,52		1615	2300			190	490
Th	190	37	11500	1,64		1845	4500			80	560
Pb	206	37	11340	1,48		327	1620			16	11-18
Re	210	71	20000	2,78		3170	5600			530	
Zr	410		6500	2,78		1857	5640			70	
Hg	940	8	13550	1,80		-39	357				

- ρ rezistivita materiálu při 20°C
 λ součinitel tepelné vodivosti
 δ hustota
 c objemová tepelná kapacita
 ϑ_m teplota měknutí
 ϑ_t teplota tavení
 ϑ_v výparné teplo
 U_{sm} napětí měknutí elektrického styku
 U_{ss} napětí svaření elektrického styku
 E modul pružnosti v tahu
 σ_p mez pevnosti v tahu



PŘÍLOHA 2 – Závislost sil a stykového odporu pro jeden kontakt

I [A]	α [°]	F_{pg} [N]	F_n [N]	F_T [N]	F_{een} [N]	F_P [N]	R_s [Ω]
300	0	0,0000	0,6227	0,0262	0,0476	0,0214	0,0041
	1	0,0109	0,6226	0,0261	0,0476	0,0323	0,0033
	2	0,0218	0,6223	0,0261	0,0476	0,0432	0,0029
	3	0,0326	0,6217	0,0261	0,0476	0,0540	0,0026
	4	0,0435	0,6212	0,0261	0,0476	0,0650	0,0024
	5	0,0543	0,6204	0,0261	0,0476	0,0758	0,0022
	6	0,0651	0,6193	0,0260	0,0476	0,0866	0,0020
	7	0,0759	0,6181	0,0260	0,0476	0,0975	0,0019
	8	0,0867	0,6167	0,0259	0,0476	0,1083	0,0018
	9	0,0974	0,6151	0,0258	0,0476	0,1191	0,0017
10	0,1082	0,6133	0,0258	0,0476	0,1300	0,0017	
350	0	0,0000	0,6227	0,0262	0,0647	0,0385	0,0031
	1	0,0109	0,6226	0,0261	0,0647	0,0495	0,0027
	2	0,0218	0,6223	0,0261	0,0647	0,0604	0,0024
	3	0,0326	0,6217	0,0261	0,0647	0,0712	0,0022
	4	0,0435	0,6212	0,0261	0,0647	0,0821	0,0021
	5	0,0543	0,6204	0,0261	0,0647	0,0929	0,0020
	6	0,0651	0,6193	0,0260	0,0647	0,1038	0,0019
	7	0,0759	0,6181	0,0260	0,0647	0,1146	0,0018
	8	0,0867	0,6167	0,0259	0,0647	0,1255	0,0017
	9	0,0974	0,6151	0,0258	0,0647	0,1363	0,0016
10	0,1082	0,6133	0,0258	0,0647	0,1471	0,0016	
400	0	0,0000	0,6227	0,0262	0,0846	0,0584	0,0025
	1	0,0109	0,6226	0,0261	0,0846	0,0693	0,0023
	2	0,0218	0,6223	0,0261	0,0846	0,0802	0,0021
	3	0,0326	0,6217	0,0261	0,0846	0,0910	0,0020
	4	0,0435	0,6212	0,0261	0,0846	0,1020	0,0019
	5	0,0543	0,6204	0,0261	0,0846	0,1128	0,0018
	6	0,0651	0,6193	0,0260	0,0846	0,1236	0,0017
	7	0,0759	0,6181	0,0260	0,0846	0,1345	0,0016
	8	0,0867	0,6167	0,0259	0,0846	0,1453	0,0016
	9	0,0974	0,6151	0,0258	0,0846	0,1561	0,0015
10	0,1082	0,6133	0,0258	0,0846	0,1670	0,0015	
450	0	0,0000	0,6227	0,0262	0,1070	0,0808	0,0021
	1	0,0109	0,6226	0,0261	0,1070	0,0918	0,0020
	2	0,0218	0,6223	0,0261	0,1070	0,1027	0,0019
	3	0,0326	0,6217	0,0261	0,1070	0,1135	0,0018
	4	0,0435	0,6212	0,0261	0,1070	0,1244	0,0017
	5	0,0543	0,6204	0,0261	0,1070	0,1352	0,0016
	6	0,0651	0,6193	0,0260	0,1070	0,1461	0,0016
	7	0,0759	0,6181	0,0260	0,1070	0,1569	0,0015
	8	0,0867	0,6167	0,0259	0,1070	0,1678	0,0015
	9	0,0974	0,6151	0,0258	0,1070	0,1786	0,0014
10	0,1082	0,6133	0,0258	0,1070	0,1894	0,0014	



Příklad výpočtů pro proud 450 A a náklon 10°:

$$F_{pg} = \cos(90^\circ - \alpha) \cdot F_G = \cos(80^\circ) \cdot 0,6227 \doteq 0,1082 \text{ N}$$

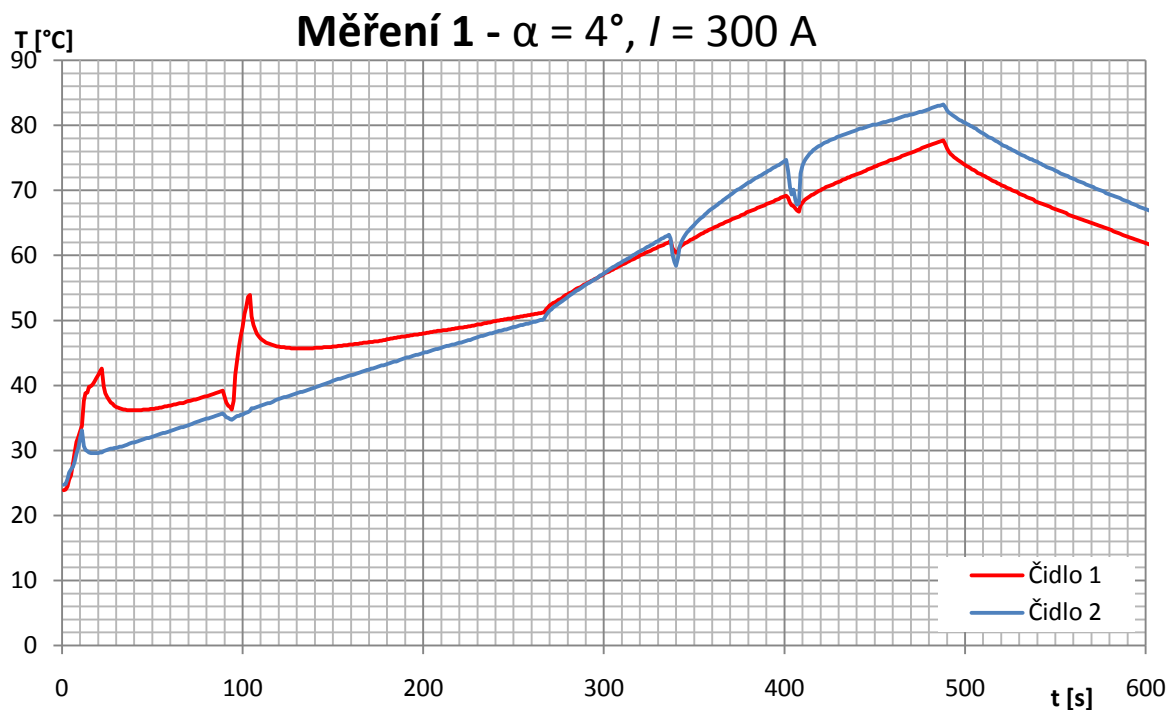
$$F_n = \sin(90^\circ - \alpha) \cdot F_G = \sin(80^\circ) \cdot 0,6227 \doteq 0,6133 \text{ N}$$

$$F_T = \frac{\xi \cdot F_n}{r} = \frac{0,21 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6133}{5 \cdot 10^{-3}} \doteq 0,0258 \text{ N}$$

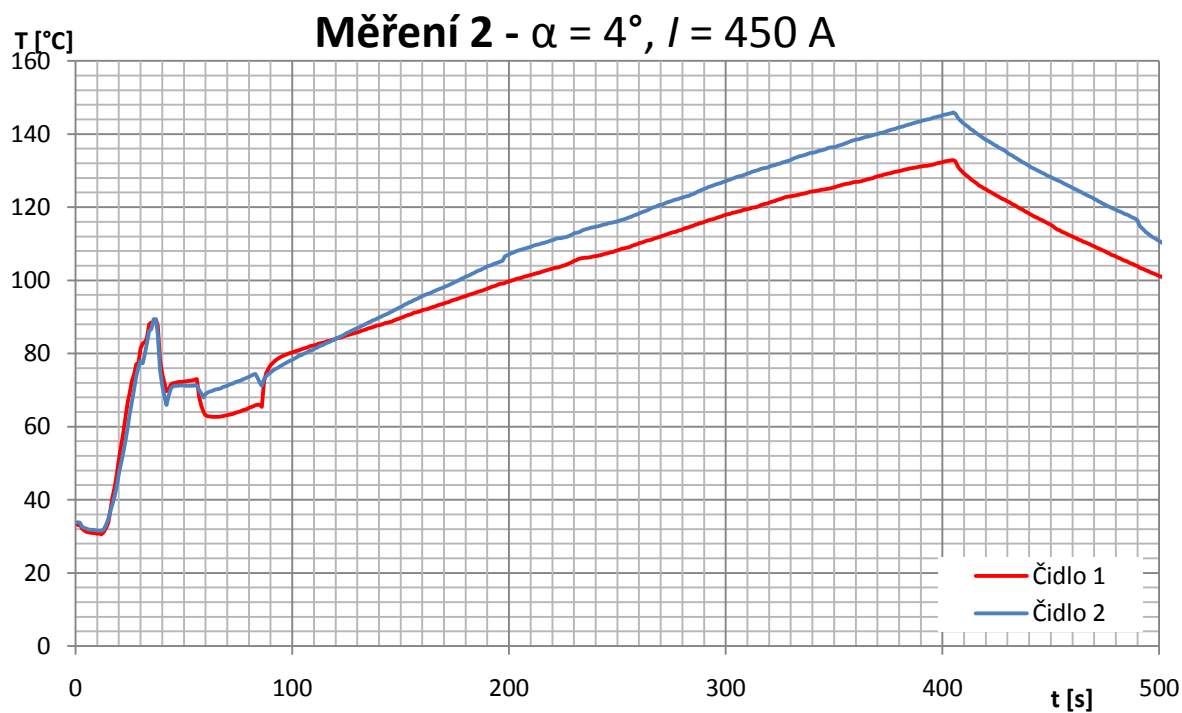
$$F_P = F_{een} + F_{pg} - F_T = 0,1070 + 0,1082 - 0,0258 = 0,1894 \text{ N}$$

$$R_S = \frac{k}{F_P^n} = \frac{0,0006}{0,1894^{0,5}} \doteq \mathbf{0,0014 \Omega}$$

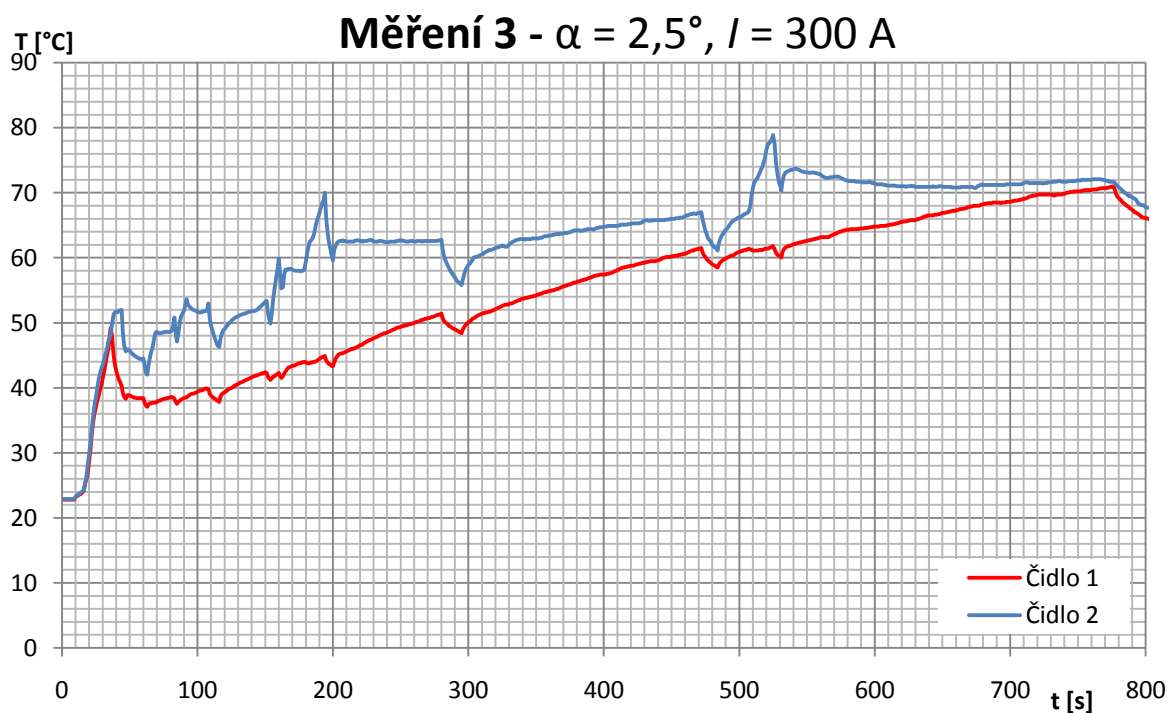
PŘÍLOHA 3 – Průběhy oteplovacích charakteristik měření na laboratorním přípravku



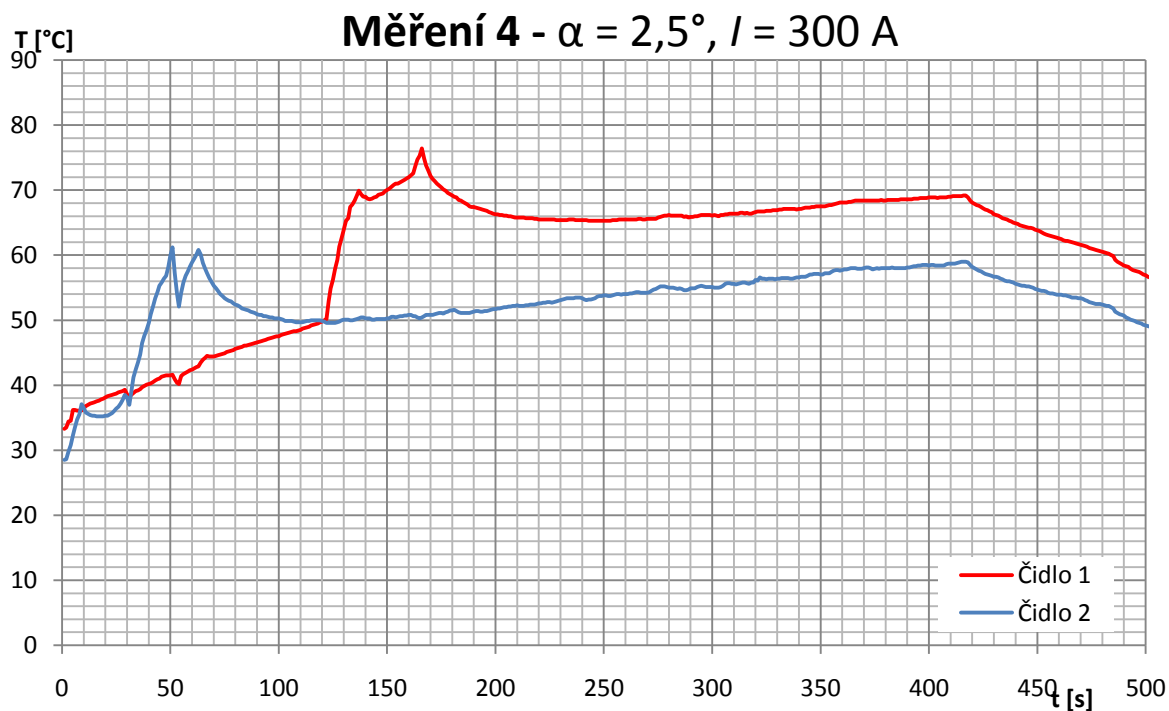
Obr. P3. 1: Oteplovací charakteristika měření 1



Obr. P3. 2: Oteplovací charakteristika měření 2



Obr. P3. 3: Oteplovací charakteristika měření 3



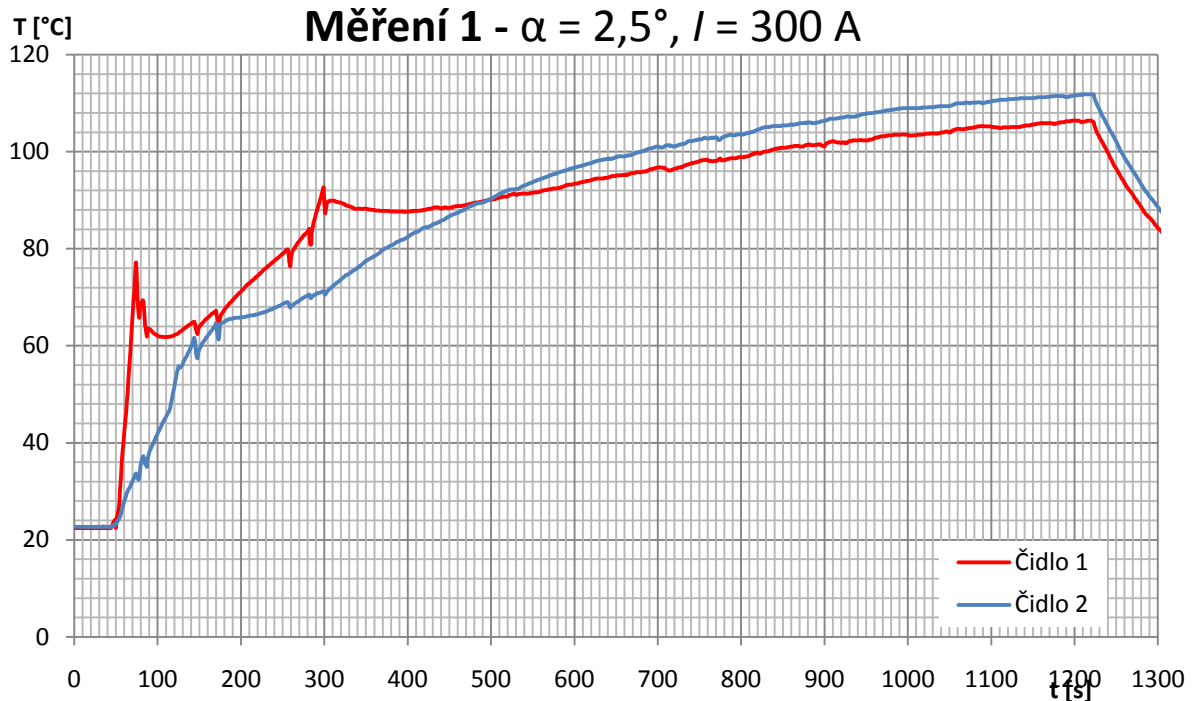
Obr. P3. 4: Oteplovací charakteristika měření 4



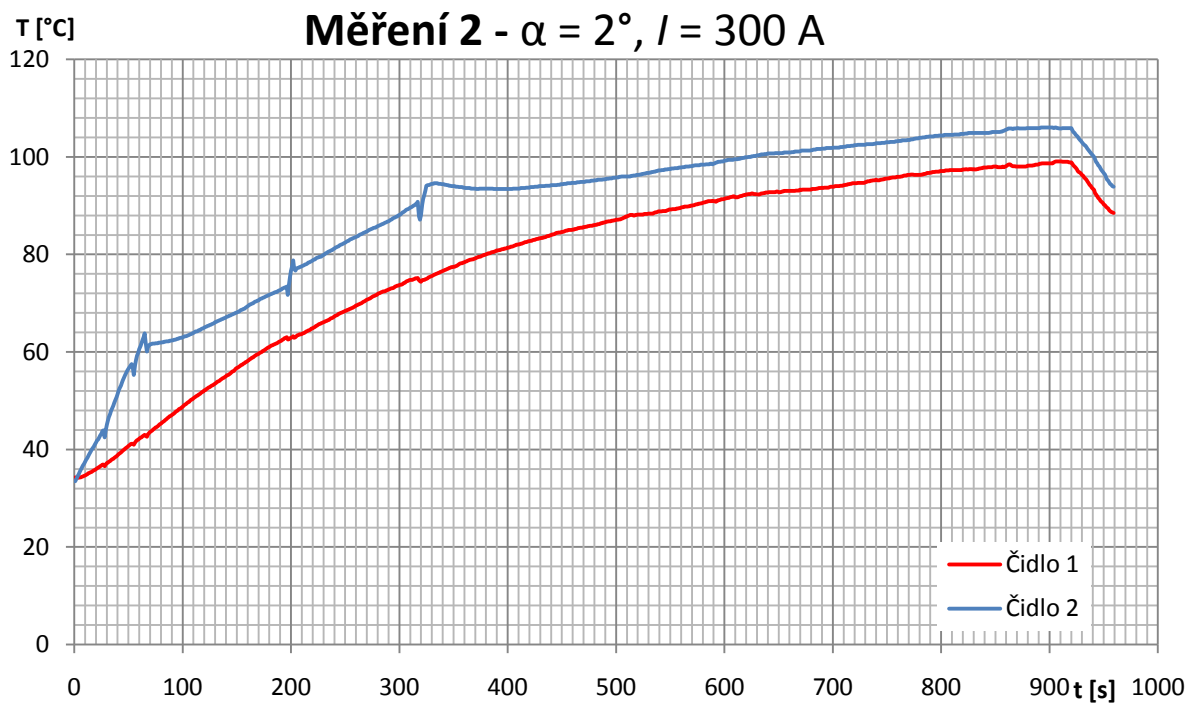
PŘÍLOHA 4 – Závislost sil a stykového odporu pro jeden kontakt po úpravě přípravku

I [A]	α [°]	F_{pg} [N]	F_n [N]	F_T [N]	F_{een} [N]	F_P [N]	R_s [Ω]
300	0	0,0000	0,5482	0,0230	0,0476	0,0245	0,0038
	1	0,0096	0,5481	0,0230	0,0476	0,0341	0,0032
	2	0,0191	0,5479	0,0230	0,0476	0,0436	0,0029
	3	0,0287	0,5474	0,0230	0,0476	0,0533	0,0026
	4	0,0382	0,5469	0,0230	0,0476	0,0628	0,0024
	5	0,0478	0,5461	0,0229	0,0476	0,0724	0,0022
	6	0,0573	0,5452	0,0229	0,0476	0,0820	0,0021
	7	0,0668	0,5441	0,0229	0,0476	0,0915	0,0020
	8	0,0762	0,5429	0,0228	0,0476	0,1009	0,0019
	9	0,0858	0,5415	0,0227	0,0476	0,1106	0,0018
	10	0,0952	0,5399	0,0227	0,0476	0,1201	0,0017
350	0	0,0000	0,5482	0,0230	0,0647	0,0417	0,0029
	1	0,0096	0,5481	0,0230	0,0647	0,0513	0,0026
	2	0,0191	0,5479	0,0230	0,0647	0,0608	0,0024
	3	0,0287	0,5474	0,0230	0,0647	0,0704	0,0023
	4	0,0382	0,5469	0,0230	0,0647	0,0799	0,0021
	5	0,0478	0,5461	0,0229	0,0647	0,0896	0,0020
	6	0,0573	0,5452	0,0229	0,0647	0,0991	0,0019
	7	0,0668	0,5441	0,0229	0,0647	0,1086	0,0018
	8	0,0762	0,5429	0,0228	0,0647	0,1181	0,0017
	9	0,0858	0,5415	0,0227	0,0647	0,1278	0,0017
	10	0,0952	0,5399	0,0227	0,0647	0,1372	0,0016
400	0	0,0000	0,5482	0,0230	0,0846	0,0615	0,0024
	1	0,0096	0,5481	0,0230	0,0846	0,0711	0,0022
	2	0,0191	0,5479	0,0230	0,0846	0,0806	0,0021
	3	0,0287	0,5474	0,0230	0,0846	0,0903	0,0020
	4	0,0382	0,5469	0,0230	0,0846	0,0998	0,0019
	5	0,0478	0,5461	0,0229	0,0846	0,1094	0,0018
	6	0,0573	0,5452	0,0229	0,0846	0,1190	0,0017
	7	0,0668	0,5441	0,0229	0,0846	0,1285	0,0017
	8	0,0762	0,5429	0,0228	0,0846	0,1379	0,0016
	9	0,0858	0,5415	0,0227	0,0846	0,1476	0,0016
	10	0,0952	0,5399	0,0227	0,0846	0,1571	0,0015
450	0	0,0000	0,5482	0,0230	0,1070	0,0840	0,0021
	1	0,0096	0,5481	0,0230	0,1070	0,0936	0,0020
	2	0,0191	0,5479	0,0230	0,1070	0,1031	0,0019
	3	0,0287	0,5474	0,0230	0,1070	0,1127	0,0018
	4	0,0382	0,5469	0,0230	0,1070	0,1222	0,0017
	5	0,0478	0,5461	0,0229	0,1070	0,1319	0,0017
	6	0,0573	0,5452	0,0229	0,1070	0,1414	0,0016
	7	0,0668	0,5441	0,0229	0,1070	0,1509	0,0015
	8	0,0762	0,5429	0,0228	0,1070	0,1604	0,0015
	9	0,0858	0,5415	0,0227	0,1070	0,1701	0,0015
	10	0,0952	0,5399	0,0227	0,1070	0,1795	0,0014

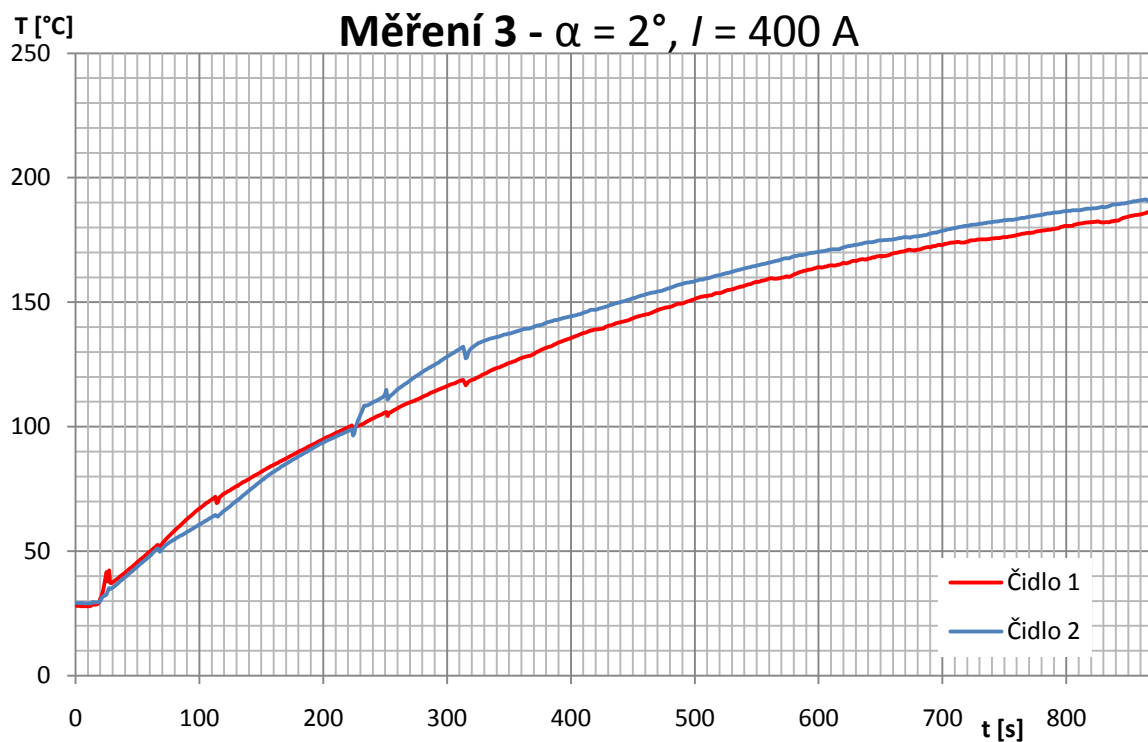
PŘÍLOHA 5 – Průběhy oteplovacích charakteristik měření na **upraveném** laboratorním přípravku



Obr. P5. 1: Oteplovací charakteristika měření 1



Obr. P5. 2: Oteplovací charakteristika měření 2



Obr. P5. 3: Oteplovací charakteristika měření 3