

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Petr Černohorský



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

VÝVOJ ZHÁŠECÍ KOMORY OBLOUKU NÍZKÉHO NAPĚTÍ

DEVELOPMENT OF DC ARC QUENCHING CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Černohorský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Petr Černohorský

ID: 174485

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Vývoj zhášecí komory oblouku nízkého napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte principy zhášení stejnosměrného elektrického oblouku.
2. Na základě nabytých znalostí vytvořte experimentální zhášecí komoru pro zkoumání chování stejnosměrného oblouku a zjistěte její parametry.
3. Za použití moderních diagnostických metod analyzujte chování oblouku ve vytvořené zhášecí komoře a navrhnete konstrukční řešení pro zlepšení technických parametrů komory.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GROSS, Boleslav. Elektrické výboje v plynech. Praha: SNTL, 1967.

[2] GROSS, Boleslav a Otto HAVELKA. Elektrické přístroje II. 2. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1980.

[3] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982, s. 129-130.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. David Šimek

Konzultant:

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

Práce je zaměřená na problematiku zhášení stejnosměrného oblouku pomocí zhášecí komory. Teoretická část práce se zabývá ději při zhášení stejnosměrného oblouku, a pochody které se dějí ve stejnosměrném výboji. V praktické části je popsán návrh a konstrukce izolační zhášecí komory. Poté komora byla podrobena testování ve vysokonapěťové laboratoři a testy následně vyhodnoceny.

Abstract

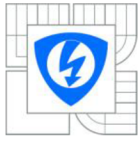
Seminar thesis focuses on the issues about quenching the electric direct arc by the quenching system. Theoretical part deals with action about quenching the direct arc and with another actions which happens in direct discharge. There is described proposal and construction of the insulating quenching system. Then chamber was testing in high voltage laboratory and the results from testing was evaluated.

Klíčová slova

Elektrický stejnosměrný oblouk; plazma; ionizace; elektrodynamické síly; konstrukce izolační zhášecí komory; stykač, 3D tisk, materiály, vysokorychlostní kamera, testování parametrů

Keywords

Electrical direct current arc, plasma, ionization, construction of the insulating quenching system, contactor, 3D printing, materials, high-speed camera, parameter testing



Bibliografická citace:

ČERNOHORSKÝ, P. *Vývoj zhášecí komory oblouku nízkého napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Šimek.



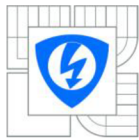
Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma *Vývoj zhášecí komory oblouku nízkého napětí* 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **28. května 2018**

.....
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 **28. května 2018**

.....
podpis autora



Obsah

Seznam obrázků.....	7
1 Úvod.....	8
2 Teorie zhášení stejnosměrného oblouku.....	9
2.1 Fyzika zhášení stejnosměrného oblouku.....	9
2.2 Ionizace.....	13
2.2.1 Definice plazmatu.....	14
2.2.2 Děje v plazmatu elektrického oblouku.....	14
2.3 Princip zhášecí komory pro stejnosměrný oblouk.....	16
2.3.1 Magnetické vyfukování oblouku do zhášecí komory.....	20
2.3.2 Princip magnetického vyfukování.....	21
3 Stykač.....	22
4 Konstrukce zhášecí komory.....	23
4.1 Úprava stykače.....	23
4.2 Konstrukce modelu pomocí 3D tisku.....	25
4.2.1 3D tiskárna Průša i3 MK2S a její princip.....	27
4.3 Použité materiály.....	29
4.4 Fotodokumentace modelu zhášecí komory.....	30
5 Vyhodnocení testování zhášecí komory.....	32
5.1 Vyhodnocení konkrétních testů.....	34
6 Návrhy konstrukčních řešení pro zlepšení parametrů komory.....	37
7 Závěr.....	39
Seznam literatury.....	40
Přílohy.....	41



Seznam obrázků

<u>Obr. 2-1</u> Základní stejnosměrný obvod	9
<u>Obr. 2-2</u> Statická voltampérová charakteristika ss. oblouku	10
<u>Obr. 2-3</u> Změna napětí a proudu při vypínacím ději	12
<u>Obr. 2.2.1-1</u> Pružné srážky	15
<u>Obr. 2.2.1-2</u> Nepružné srážky prvního řádu (vlevo), nepružné srážky druhého řádu (vpravo)	16
<u>Obr. 2.3-1</u> Izolační roštová zhášecí komora.....	17
<u>Obr. 2.3-2</u> Izolační štěrbinová zhášecí komora	18
<u>Obr. 2.3-3</u> Deformace jádra oblouku ve štěrbinové zhášecí komoře	19
<u>Obr. 2.3-4</u> Štěrbinová zhášecí komora s pomocnými kanály	20
<u>Obr. 2.3.1-1</u> Obloukový výboj v příčném řezu; v proudu vzduchu (vpravo), pod vlivem magnet. pole (vlevo).....	21
<u>Obr. 2.3.2-1</u> Působení magnetického pole na oblouk v mezikontaktním prostoru	21
<u>Obr. 3-1</u> Stykač s elektromagnetickým mechanismem	22
<u>Obr. 4.1-1</u> Finální podoba stykače po úpravě.....	24
<u>Obr. 4.2 - 1</u> Navrhnutý 3D model v softwaru SolidWorks 2016	25
<u>Obr. 4.2 - 2</u> První základní část modelu zhášecí komory	26
<u>Obr. 4.2 - 3</u> Druhá část modelu - krytka s výřezem pro sklo	26
<u>Obr. 4.2.1 -1</u> 3D tiskárna Průša	27
<u>Obr. 4.2.1 -2</u> Software Slicer Prusa Edition	28
<u>Obr. 4.4 - 1</u> Pohled do modelu izolační zhášecí komory	30
<u>Obr. 4.4 - 2</u> Magnetický obvod (samostatně)	30
<u>Obr. 4.4 - 3</u> Přední průhledný krytzhášecí komory.....	31
<u>Obr. 4.4 - 4</u> Boční stěna komory (obr-vlevo); zadní stěna komory (obr-vpravo)....	31
<u>Obr. 5.1</u> Upravený arc-runner.....	34
<u>Obr. 5.2</u> Opotřebení kontaktů.....	34
<u>Obr. 5.1.1</u> Prodlužování oblouků mezi rošty komory.....	36
<u>Obr. 5.1.2</u> Detail vypínacího napětí a proudu.....	37
<u>Obr. 6.1</u> Návrh konstrukce komory.....	38



1 Úvod

Přístrojová technika se zabývá spínacími elektrickými přístroji, kde při spínacích procesech mezi kontakty vzniká elektrický oblouk, který je svými tepelnými účinky poškozuje. Proto je třeba v přístrojích oblouk účinně zhasět, jak při běžném spínání obvodů, tak při neobvyklých situacích, kdy obvodem protéká zkratový proud. Existují dva typy oblouků: střídavý a stejnosměrný. Tato práce se bude zabývat stejnosměrným obloukem.

Zhášení stejnosměrného elektrického oblouku je oproti střídavému elektrickému oblouku složitější, protože stejnosměrný oblouk neprochází nulou proudu jako je to u střídavého elektrického oblouku. Pro zhašení stejnosměrného oblouku platí jiné podmínky, které budou popsány zároveň se vznikem výboje mezi kontakty v úvodní části této práce.

V praktické části bude popis a konstrukce experimentální zhašecí komory pro stejnosměrný proud, navržené pro můstkový elektromagnetický stykač.

Dále bude provedena a vyhodnocena testovací zkouška, při které se zaznamenají pomocí optické diagnostiky vlastnosti a chování stejnosměrného oblouku ve zhašecí komoře, a zároveň se otestuje vypínací schopnost stykače s navrženou zhašecí komorou.

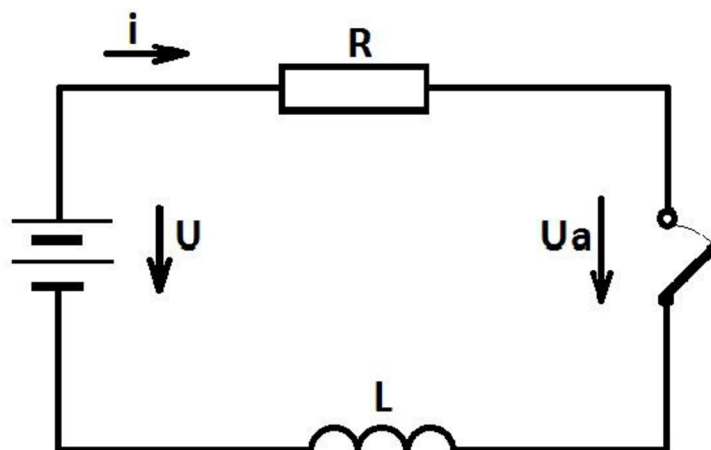
V závěrné části práce budou navrženy konstrukční řešení pro zlepšení parametrů a funkce zhašecí komory.

2 Teorie zhášení stejnosměrného oblouku

Přerušíme-li elektrický proud v obvodu, vyvoláme tím změnu v ustáleném energetickém toku. Tok elektrické energie se podle zákona akce a reakce brání. Výsledným jevem v silnoproudých obvodech je oblouk, tj. druh elektrického výboje v plynech, který způsobí, že proud obvodu se nepřeruší v okamžiku oddálení kontaktů, ale protéká i po jejich oddálení. Způsobuje to elektrické pole mezi kontakty, které ionizuje plynné (kapalně) prostředí mezi kontakty. Protože ionizované prostředí obsahuje volné nosiče náboje, vzniká nežádoucí jev v oblasti elektrických přístrojů, který nazýváme elektrický oblouk. Přerušeni obvodu nastane až poté, co zhasne oblouk a obnoví se dielektrická pevnost prostředí mezi kontakty.

2.1 Fyzika zhášení stejnosměrného oblouku

Zdroj elektromotorické síly v obvodu stejnosměrného proudu dodává do výbojového sloupce mezi kontakty přístroje stálé množství energie a udržuje tak stálou rovnováhu mezi ionizačními a deionizačními pochody. S růstem proudu se zvyšuje teplota oblouku, procesem tepelné ionizace vzrůstá počet ionizovaných částic, klesá odpor oblouku a tím i obloukové napětí. Současně s tímto procesem probíhá i proces deionizace, takže v ustáleném stavu existuje mezi oběma procesy rovnováha. Z tohoto důvodu může stejnosměrný oblouk uhasnout pouze v případě, že vnějším zásahem dojde k narušení rovnovážného stavu a převládnutí deionizačních pochodů. Prakticky to znamená nutnost zvýšit odpor oblouku natolik, aby se oblouk dostal do takzvaného labilního stavu. [1]



Obr. 2 - 1 Základní stejnosměrný obvod

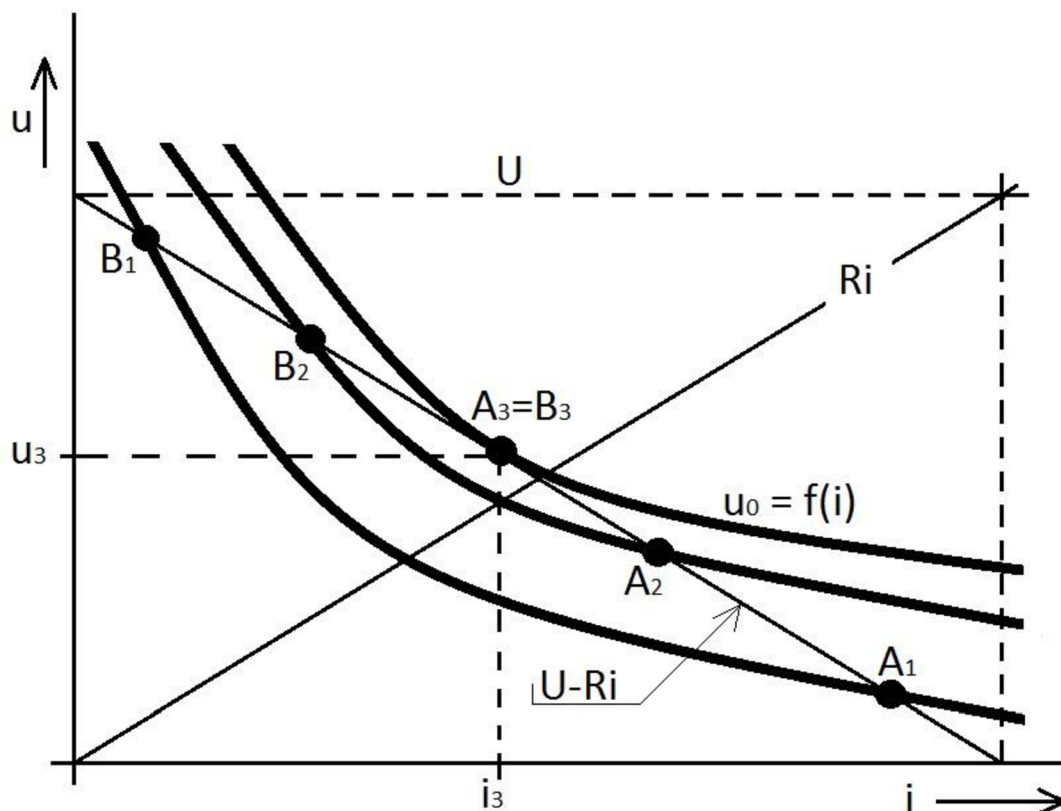
Uvažujeme-li jednoduchý stajnosměrný obvod podle obrázku (obr. 2-1), lze podle II. Kirchofova zákona psát:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + u_a \quad (2.1)$$

Při nulové změně proudu bude obvod ve stacionárním stavu a je možné sestavit statickou voltampérovou charakteristiku oblouku. Její matematické vyjádření formulovala Ayertonová tak, že napětí na oblouku U_a (V) závisí na délce oblouku l (m), materiálu elektrod a prostředí, ve kterém oblouk hoří (konstanty α (V), β (V/m), γ (w), δ (W/m))

$$u_a = \alpha + \beta l + \frac{\gamma + \delta l}{i} \quad (2.2)$$

Grafické znázornění této závislosti je na obrázku (obr. 2-2). Pro uvedení oblouku do labilního stavu musíme dosáhnout splnutí bodu A (bod stabilního hoření oblouku) a bodu B (bod labilního hoření oblouku).



Obr. 2 - 2 Statická voltampérová charakteristika ss. oblouku



Prakticky lze tohoto stavu dosáhnout pouze změnou charakteristiky oblouku směrem k vyšším napěťovým hodnotám, a to tak, že působením na oblouk zvyšujeme jeho odpor. Charakteristika oblouku se posouvá směrem nahoru až se rozdílová přímka $U - RI$ stane tečnou charakteristiky. Proud i_3 je nejmenší proud, při kterém oblouk ještě může hořet. Při poklesu proudu pod tuto hodnotu se oblouk dostává do labilního stavu, nestačí do oblouku dodávat tolik energie, aby byla udržena rovnováha ionizačních a deionizačních pochodů, proud klesá k nule a rekombinace proběhne až do konce.

Tuto skutečnost lze posoudit také na základě energetické bilance oblouku v časovém intervalu jeho hašení pomocí rovnice:

$$\int_0^{t_a} u \cdot i \cdot dt = \int_0^{t_a} i^2 \cdot R + \int_0^{t_a} u_a \cdot i \cdot dt + \int_{I_k}^0 L \cdot i \cdot di \quad (2.3)$$

Rovnice (2.3) vyjadřuje, že celková energie dodávaná zdrojem se rozdělí na energii ztracenou Jouleovými ztrátami v činném odporu obvodu, energii ztracenou ve výbojovém sloupci a na nahromaděnou energii v indukčnosti obvodu. Upravíme-li rovnici na tvar

$$\int_0^{t_a} u_a \cdot i \cdot dt = \int_0^{t_a} u \cdot i \cdot dt - \int_0^{t_a} i^2 \cdot R \cdot dt + \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (2.4)$$

vidíme, že při hašení oblouku je třeba odvést energii dodanou do oblouku zdrojem a navíc elektromagnetickou energii dodávanou do oblouku z indukčnosti obvodu. Podle dosavadních výzkumů tato elektromagnetická energie činí 94-97 % celkové energie. Energie uvolněná obloukem se částečně spotřebuje na ohřev okolního prostředí oblouku a částečně na ohřev výbojové dráhy. Pro hašení je důležité, aby jeho teplota klesala, jinými slovy, aby energetická bilance oblouku byla záporná.

Způsob, jak docílit žádaných poměrů pro uhašení oblouku bude nejlépe patrný, upravíme-li rovnici Ayertonové na tvar:

$$u_a = \left(\alpha + \frac{\gamma}{l} \right) + l \left(\beta + \frac{\delta}{l} \right) = u_e + El \quad (2.5)$$

Vidíme, že změny charakteristiky oblouku lze dosáhnout třemi způsoby, tj. změnou úbytků napětí na elektrodách, změnou gradientu oblouku a změnou délky oblouku.

Zvýšení úbytku napětí na elektrodách dosáhneme tím, že do výbojové dráhy vložíme napříč kovové desky, oblouk se rozčlení na několik dílčích oblouků v sérii a tím se úbytky na katodě a anodě úměrně zvýší.

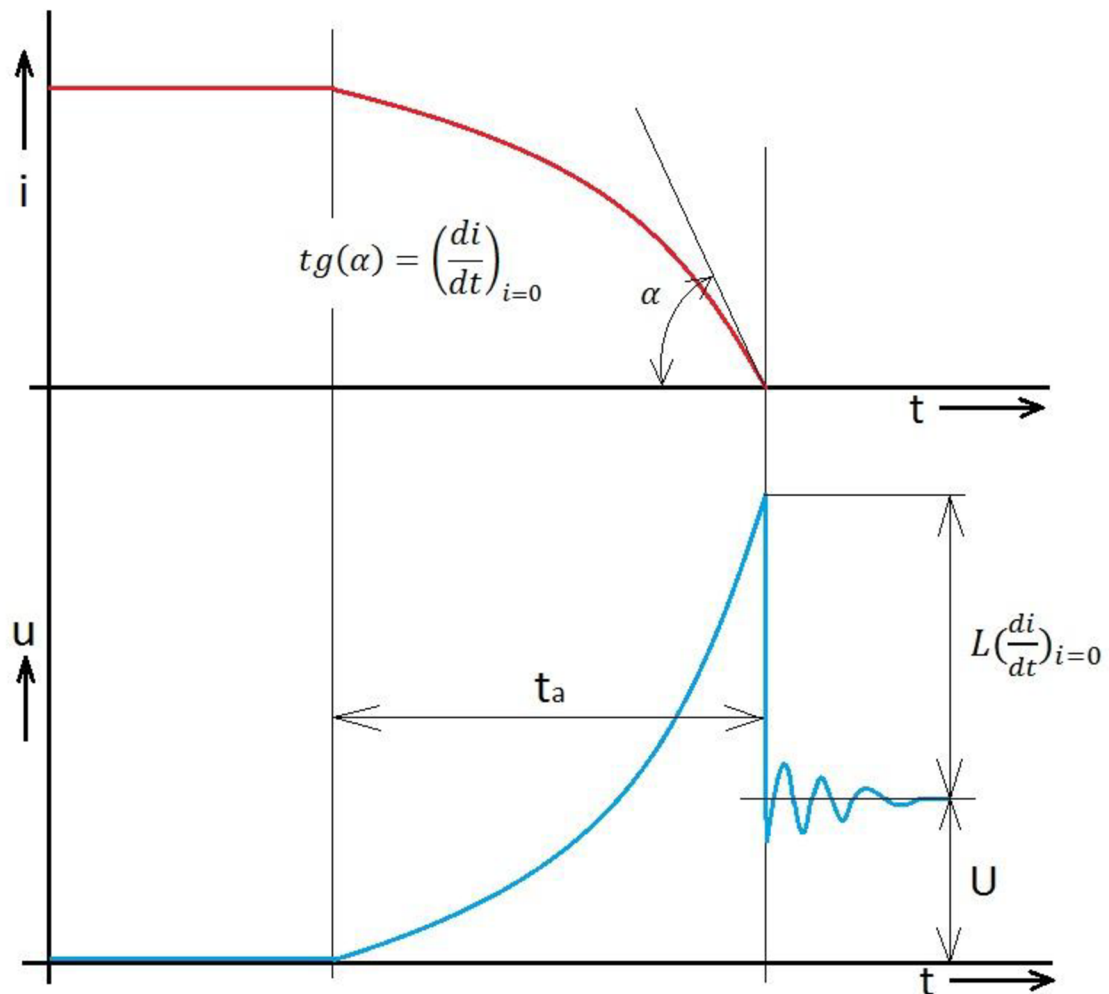


Zvýšení gradientu oblouku dosahujeme tím, že zvýšíme chlazení oblouku. Intenzivního chlazení oblouku dosáhneme tak, že oblouk uvedeme do styku s chladnými izolačními stěnami. Účinek je tím vyšší čím užší je štěrba.

Zvětšování délky oblouku provádíme vhodnou úpravou tvarů kontaktů zhášecí komory. Potřebná zhášecí délka je podle rovnic (2.1) a (2.5)

$$l_{zk} \geq \frac{U + L \left(\frac{di}{dt} \right) - Ri - u_e}{E} \quad (2.6)$$

Na základě dosud uvedených skutečností lze charakterizovat zhášení oblouku stejnosměrného proudu jako postupné zvyšování odporu až na nekonečnou hodnotu a tím zmenšování proudu až na nulu. Zvyšování odporu oblouku se projevuje narůstáním obloukového napětí až na hodnotu napětí zdroje. V případě obecného induktivního obvodu však obloukové napětí může několikanásobně převýšit velikost napětí zdroje. Se zmenšováním proudu se na indukčnosti vytváří záporný úbytek napětí $u_L = -L \frac{di}{dt}$, který se podle rovnice (2.1) přičítá k napětí zdroje a zvyšuje tak velikost napětí obvodu. Velikost tohoto úbytku je závislá na strmosti změny proudu di/dt , která je zase závislá na intenzitě deionizace výbojové dráhy, tj. na velikosti odporu výbojové dráhy (obr.2-3). Oblouk ovšem nehoří až do té doby, kdy odpor dosáhne určité velikosti a obvod přejde do labilního stavu. Obloukové napětí dosahuje největší velikosti v okamžiku zániku a po jeho uhasnutí klesá na velikost napětí zdroje. Tento přechodný děj bývá obvykle utlumen vlivem zbytkové vodivosti výbojové dráhy [1].

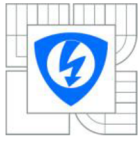


Obr. 2 - 3 Změna napětí a proudu při vypínacím ději

Vysoká přepětí jsou charakteristickým průvodním znakem při vypínání obvodů stejnosměrného proudu. V konstrukci zhášedel obloukustejnosměrného proudu musíme respektovat dva protichůdné požadavky. Abychom zkrátili dobu hoření oblouku, což je žádoucí vzhledem k jeho nepříznivým tepelným účinkům na materiál kontaktů a zhášecí komory, je žádoucí, aby v oblasti velkých proudů byla strmost co největší a v oblasti poklesu proudu k nule co nejmenší. Prakticky to znamená zajištění prudkého vzrůstu odporu výbojové dráhy v počátku hoření oblouku a jeho pomalejší nárůst v konečné fázi vypínacího procesu. [1]

2.2 Ionizace

Dodáváním tepla látce plynného skupenství má za následek zvětšování kinetické energie molekul látky. Při určité teplotě je jejich energie tak velká, že se při srážkách rozpadají na jednodušší molekuly a atomy. Zvětšujeme-li dále energii



částic, dochází při srážkách k uvolňování elektronů z elektronových obalů atomových jader.

Samostatný atom jako celek je na venek neutrální. V případě, že při ionizaci dojde k oddělení elektronů od jádra atomů, elektrony se stávají nosičem záporného náboje a jádra naopak nosičem kladného náboje

2.2.1 Definice plazmatu

Ke vzniku plazmatu dojde při zahřívání plynné látky na určitou mez, kdy začne docházet k ionizaci její částic. Dojde k narušení určitých druhů vazeb, vazby elektronu s atomovým jádrem. Mluvíme o tzv. čtvrtém skupenství látek. Vlastnosti plazmatu se od ostatních skupenství velmi odlišují a změna chování při přechodu od plynu k plazmatu je největší ze všech přechodů skupenství. V plazmatu se nacházejí volné nosiče nábojů (elektrony a ionty), a proto plazma jako jediné skupenství reaguje na elektrická a magnetická pole. Tato reakce je kolektivní: nabitě částice reagují společně, jako jeden celek. Mohou se pod vlivem polí rozvlíknit, vytvořit struktury složené ze stěn a vláken nebo mohou společně vytvořit makroskopická elektrická a magnetická pole. Hovoříme o tzv. kolektivním chování plazmatu.

Chemik Irwing Langmuir (1881-1957), stanovil tři základní podmínky, které musí plazmatické skupenství splňovat:

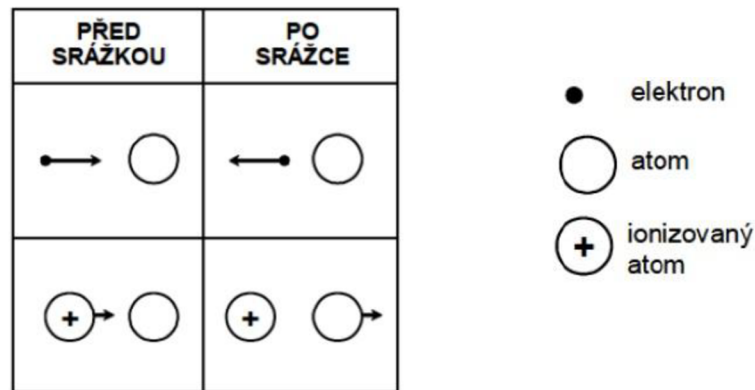
Plazma obsahuje volné nosiče nábojů. Zpravidla jde o elektrony a ionty různé násobnosti, které jsou schopné vést elektrický proud.

Plazma vykazuje kolektivní chování - reaguje na elektrická a magnetická pole jako celek a je schopné obě pole samo vytvářet.

Plazma je kvazineutrální, tj. obsahuje v každém makroskopickém objemu stejný počet kladných i záporných částic. [4]

2.2.2 Děje v plazmatu elektrického oblouku

Srážky, ke kterým dochází při chaotickém pohybu částic, dělíme na pružné a nepružné. Při menší kinetické energii částic nastávají srážky pružné, při nichž se mění jen rychlost a směr pohybu.



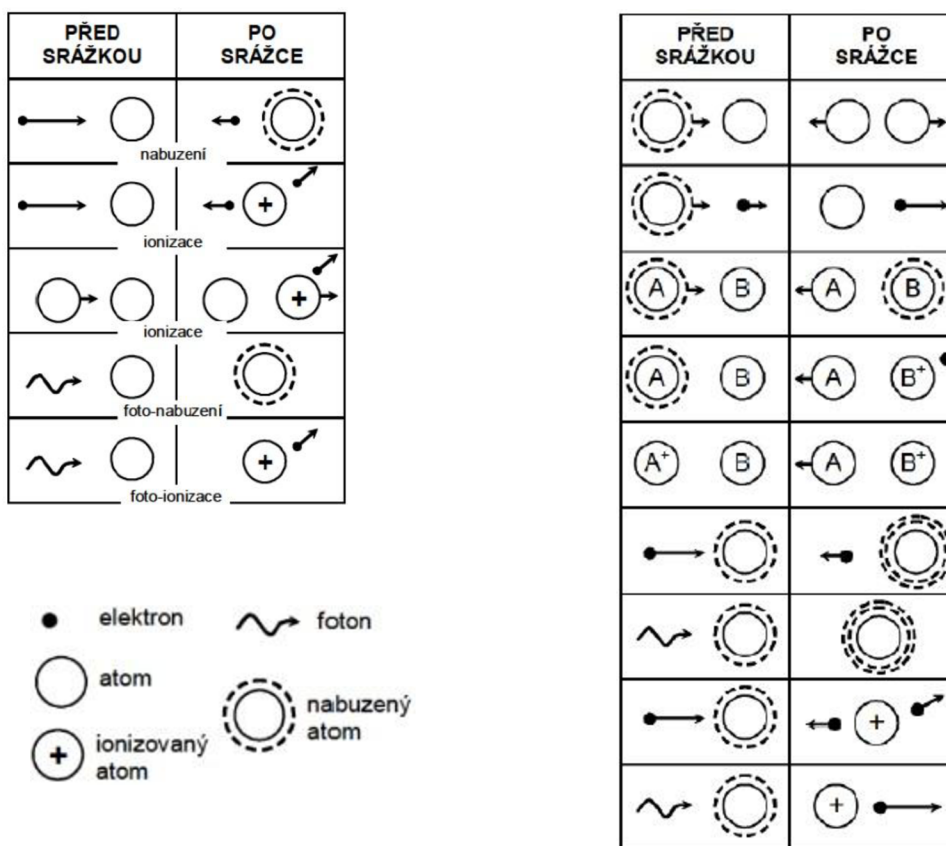
Obr. 2.2.1 - 1 Pružné srážky [3]

Přestoupí-li energie letící částice (ionizační energie) určitou mez, dochází ke srážce nepružné. Při nepružné srážce nastává změna struktury atomu. To znamená, že se z elektronového obalu atomu jeden (vnější) elektron oddělí. Jednalo-li se o srážku částice s atomem, vzniknou nepružnou srážkou z původních dvou částic, částice tři: působící částice, záporně nabitý elektron a zbytek jádra (kladný iont). Částicí, která vyvolává nepružnou srážku, může být kterákoliv: molekula, atom, iont nebo elektron. Musí však mít větší kinetickou energii než je ionizační energie částice, na kterou naráží.

Nepružné srážky částic dělíme dále na:

Nepružné srážky prvního řádu - mění kinetickou energii částic před srážkou na potenciální energii částic po srážce (viz obr.2.2.1-2). Atom je poté nabuzený (ionizovaný). Do srážek prvního řádu spadá také ionizace zářením (foton \Rightarrow atom).

Nepružné srážky druhého řádu - mění potenciální energii částic před srážkou na převážně kinetickou energii částic po srážce (viz obr.2.2.1-2). Při srážce nabuzeného atomu a částice s malou kinetickou energií se energie atomu přemění v kinetickou energii částice (urychlení částice).



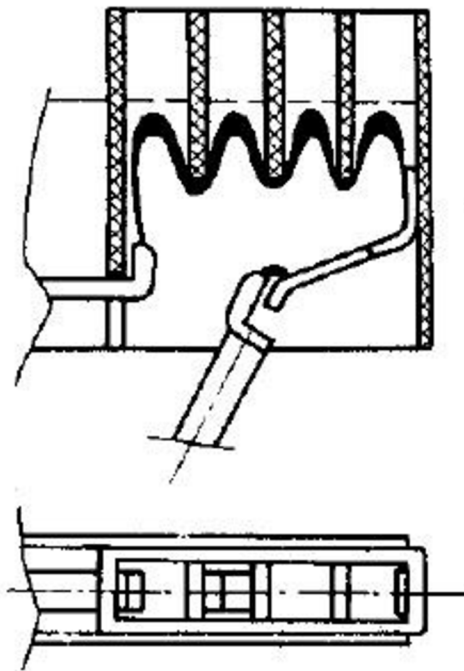
Obr. 2.2.1 - 2 Nepružné srážky prvního řádu (vlevo), nepružné srážky druhého řádu (vpravo) [3]

V plazmě existuje ještě další druh srážek, nazývaný rekombinace. Je to obrácený pochod vzhledem k ionizaci. Kladný iont a elektron se spojí v neutrální atom a při spojení se uvolní energie spotřebovaná na ionizaci. V jaký druh energie se změní, závisí na místě, kde k rekombinaci dojde. Může k ní dojít na stěně ohraničující plazma výboje (teplo), na elektrodě (teplo) a nebo v prostoru vyplněném plazmou (záření). [2]

2.3 Princip zhášecí komory pro stejnosměrný oblouk

Zhášecí komory jsou kovové a izolační. Kovové zhášecí komory se využívají především u střídavého proudu, protože zháší díky rozdělení oblouku pomocí kovových roštů na dílčí obloučky a jednotlivé úbytky napětí, proto nelze tento způsob zhášení použít pro stejnosměrný oblouk, kde při zhášení vzniká podstatně větší napětí mezi kontakty, což by vyžadovalo mnohem více roštů zhášecí komory.

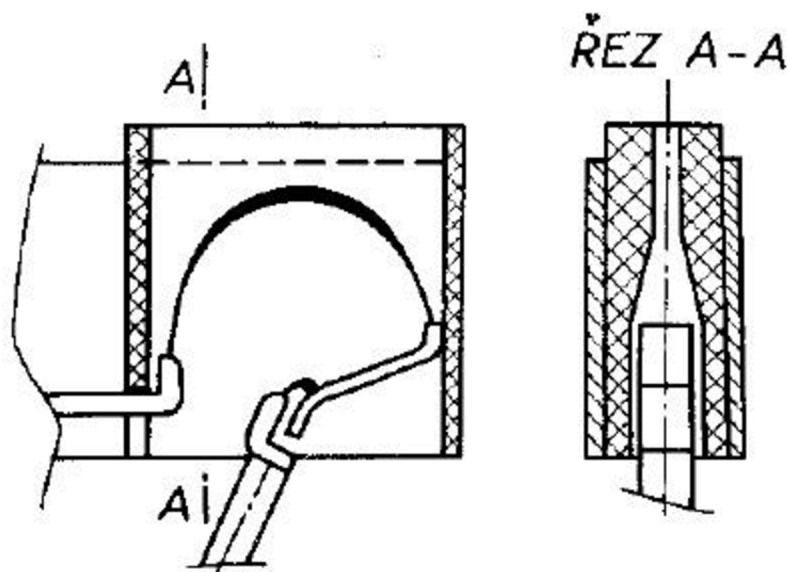
Pro stejnosměrný oblouk se tedy využívá izolační zhášecí komora. Skutečných provedení izolačních zhášecích komor je celá řada. V podstatě můžeme vymezit dvě principiální uspořádání, která lze různým způsobem realizovat, obměňovat a kombinovat. Označíme je jako komoru roštovou a komoru šterbinovou.



Obr. 2.3 - 1 Izolační roštová zhášecí komora[5]

Provedení komory s izolačním roštem zachycuje obrázek (obr. 2.3-1). Vznikla z izolačního obalu obloukového prostoru vložení několika žeber napříč k ose oblouku. Vyfukovaný oblouk se na jejich čelních hranách zadrží a prodlouží do několika vln. Oblouk na čelních hranách setrvává poměrně dlouhou dobu. Při opakovaném vypínání větších proudů dochází k vypalování materiálu a k následnému opotřebení zhášecí komory, proto je třeba užívat vysoce tepelně odolné materiály např. keramiku, teflon, sklo atd. Pro vypínání stejnosměrného proudu hraje hlavní roli zvětšení odporu oblouku jeho velkým prodloužením. Vypínací výkon je omezen zahlcením komory ionizovaným prostředím. Obloukem ohřátý vzduch na vysokou teplotu uniká otevřeným stropem komory do okolí. Od určité velikosti proudu je tohoto horkého až ionizovaného plynu takové množství, že vyplní celou komoru včetně prostoru mezi kontakty, kde je doskoková vzdálenost nejkratší. Pak dochází vlivem zotavujícího se napětí ke znovuzápalu oblouku mezi kontakty, celý vyfukovací pochod se opakuje, ale oblouk zase opakovaně zapaluje. Další možnost znovuzapálení při zahlcené komoře je dráhou

nad roštem (vně zhášecí komory). V tomto případě oblouk zůstává trvale hořet a dochází k destrukci přístroje.



Obr. 2.3 - 2 Izolační štěrbinová zhášecí komora[5]

Štěrbinová komora je obecně výkonnější než komora roštová. Ve štěrbinové komoře podle obrázku (obr. 2.3-2) uvádíme oblouk celou jeho délkou do těsného styku s chladnými stěnami. Vzdálenost stěn komory ze žáruvzdorného materiálu se nad kontakty pozvolna zužuje do úzké štěrbiny (nahore otevřené). Jako úzkou označujeme z hlediska zhášení oblouku takovou štěrbinu, jejíž šířka je menší než průměr válcově idealizovaného obloukového jádra. Oblouk narůstající délky je magnetickým polem vtlačován do štěrbiny a jeho původně kruhový průřez se deformuje, jak naznačuje obráček (obr. 2.3-3). Tím se zvyšuje povrch jádra a dostává se do těsného styku s chladnými izolačními stěnami, které mu mohou intenzivněji odebírat teplo. Zvýšeným odvodem tepla z oblouku se zvětšuje jeho odpor a na oblouku se soustřeďuje vyšší napětí. Gradient oblouku se zužující se šířkou štěrbiny zvětšuje hyperbolicky. Proto při stejné délce oblouku je zhášecí účinnost komory s úzkou štěrbinou při stejnosměrném proudu vyšší než poměrně široké komory roštové. [5]



Obr. 2.3 - 3 Deformace jádra oblouku ve štěrbinové zhášecí komoře[5]

Má-li být vliv stěn trvale účinný, musí se oblouk ve štěrbině pohybovat. Kdyby se zastavil na jednom místě, ohřál by přilehlé části stěn a teplotní spád by poklesl. Pohyb je nutný i proto, že neexistuje materiál, který by dlouhodobě odolával teplotě oblouku. Keramické materiály snáší trvalé teploty kolem 1000°C. Po velmi krátkou dobu odolávají i teplotám vyšším. Proběhne-li oblouk po keramické stěně dosti rychle, nataví se pouze tenká povrchová vrstva, která v zápětí hned ztuhne. Vypalování stěn z pohledu úbytku materiálu je nežádoucí, protože dochází k rozšiřování štěrbin, což se projeví nižší účinností zhášení. Rychlost magneticky vyfukovaného oblouku je značná, celková doba hoření je krátká a výšky komor zůstávají v přijatelných velikostech.

Vypínací schopnost štěrbinové izolační komory je omezena stejně jako u komor roštových, a to množstvím kumulovaného tepla a ionizovaného plynu. Pro usnadnění úniku obloukových zplodin a tím zvětšení vypínacího proudu se u vypínačů vyšších napětí upravují v komoře pomocné kanály, jak je naznačeno na obrázku (obr. 2.3-4). [5]



Obr. 2.3 - 4 Štěrbinová zhášecí komora s pomocnými kanály[5]

2.3.1 Magnetické vyfukování oblouku do zhášecí komory

Jevy spojené s pohybem oblouku v elektromagnetickém poli jsou závažnou otázkou konstrukce magnetických vypínačů.

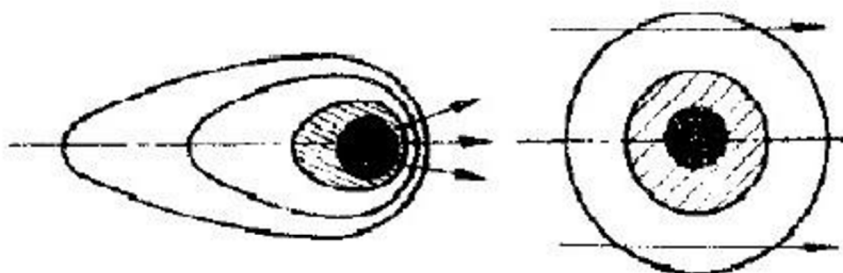
Přístroje s tímto systémem působení na oblouk jsou stručně nazývány jako magnetické vypínače. Výsadní postavení zauímají přístroje tohoto systému v oblasti nízkého napětí, kde obvykle vystačíme s jednoduchou zhášecí komorou. V oblasti vysokého napětí je konstrukční řešení magnetických vypínačů podstatně složitější, zejména v konstrukci zhášecího ústrojí.

Magnetické vypínače mají vlastní zhášecí energii se všemi charakteristickými znaky této skupiny přístrojů (možný výskyt kritické oblasti proudů, růst vypínací výkonnosti s rostoucím proudem). Protože tyto vypínače pracují ze všech systémů s nejvyšším obloukovým napětím, jsou vhodné i pro zhášení oblouku stejnosměrného proudu.

Magnetické pole není přímým zhášecím prostředkem. Jeho vlivem se oblouk dostává do pohybu napříč okolním vzduchem, přičemž se každý element oblouku mění co do délky a současně se pohybuje ve směru kolmém na změnu délky.

Kromě délky oblouku má na chlazení vliv i jeho rychlost, kterou se pohybuje v médiu mezikontaktního systému. Efektivnost chlazení při relativním pohybu oblouku v prostředí je mnohem větší, než například při ofukování stlačeným vzduchem, viz obr.2.3.1-1. Pokud je oblouk unášen proudem okolního média, je vzdálenost jeho jádra od vnějších vrstev stejná a takové chlazení má za následek pouze větší odvod teplých částic z povrchu oblouku. Zatímco působením magnetického pole je unášeno jádro oblouku v okolním prostředí, nechává za

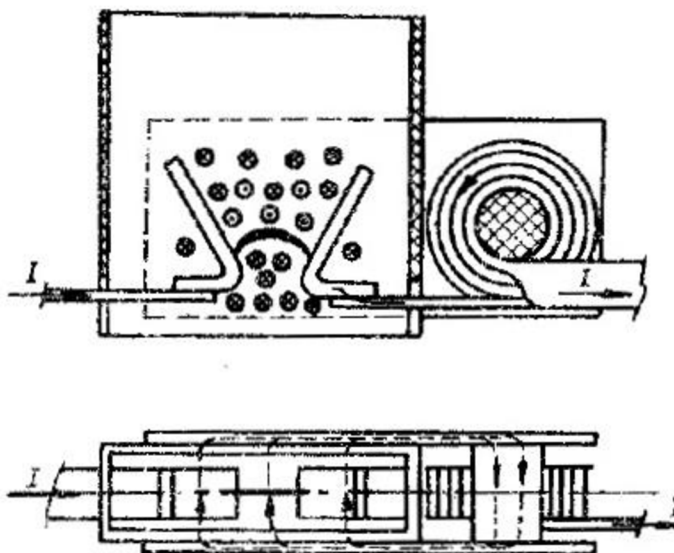
sebou ionizované plyny a dostává se tak do styku s větším počtem studených neionizovaných částic. [5]



Obr. 2.3.1 - 1 Obloukový výboj v příčném řezu; v proudu vzduchu (vpravo), pod vlivem magnet. pole (vlevo)[5]

2.3.2 Princip magnetického vyfukování

Podstatou magnetického vyfukování oblouku je interakce magnetického pole oblouku s magnetickým polem jiného úseku proudovodné dráhy vypínače, zavedeným vhodně do mezikontaktního prostoru. Zdrojem tohoto druhého pole bývá zhášecí cívka (permanentní magnety), vřazená do série s kontakty. Cívka má železné jádro, které vybíhá v pólové nástavce obklopující kontakty (obr. 2.3.2-1).



Obr. 2.3.2 - 1 Působení magnetického pole na oblouk v mezikontaktním prostoru[5]

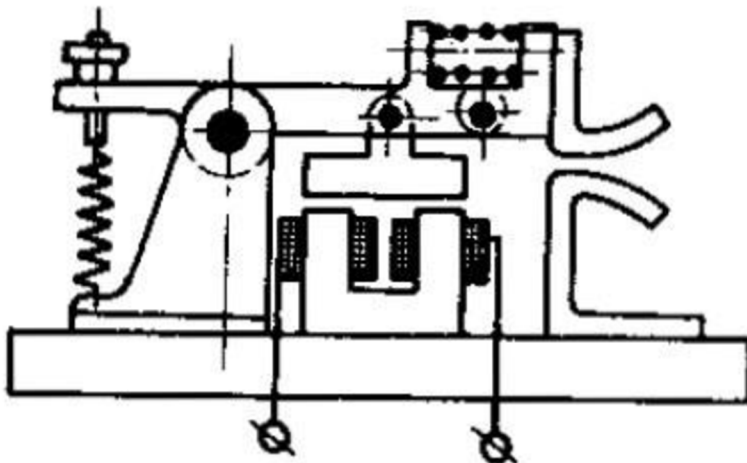
Magnetické pole oblouku, vytaženého mezi oddalujícími se kontakty, jde podle zakresleného směru proudu nad obloukem dopředu, pod obloukem dozadu. Magnetické pole zhášecí cívky prochází z železného jádra přes pólové nástavce a v

prostoru kontaktů se uzavírá vzduchovou mezerou. Směr vinutí cívky musí být orientován tak, aby její magnetické pole mělo opačný směr než pole výbojové dráhy nad obloukem. Pak dochází k zeslabení výsledného magnetického pole nad obloukem a na oblouk působí elektrodynamické síly, které jej vytlačují vzhůru. Kontakty jsou prodlouženy v růžky, jejichž vzájemná vzdálenost se zvětšuje. Oblouk se po nich rychleji posouvá, prodlužuje se a vzdaluje se od místa svého vzniku. Pólové nástavce se nacházejí vně komory.

3 Stykač

Stykač je dálkově ovládaný přístroj, určený pro časté a převážně krátkodobé spínání motorů a jiných spotřebičů. Stykač má stabilní jen jednu polohu, zpravidla polohu vypnutou. Do druhé polohy se kontakty převádějí strojním mechanismem a setrvávají v ní jen, pokud tento mechanismus působí. Jakmile přestaneme působit, kontakty se vrátí do výchozí klidové polohy pomocí vypínací pružiny, nebo pouhou vahou mechanismu. Aby potřeba vratné síly byla co nejmenší, používá se výhradně kontaktů s čelním stykem.

Zapínací mechanismus stykače může být trojího druhu: váčkový, pneumatický nebo elektromagnetický. V našem případě byl použit stykač se spínáním pomocí elektromagnetického mechanismu, který je také nejrozšířenější. Provedení stykače je schématicky naznačené na obrázku (obr. 3 - 1)



Obr. 3 - 1 Stykač s elektromagnetickým mechanismem[5]

Ovládací elektromagnet může být napájen na stejnosměrný nebo střídavý proud a může být napájen z pomocného zdroje nebo přímo ze sítě, na kterou stykač připíná spotřebič. Elektromagnetický stykač je ve své podstatě relé, neboť pomocí malého



proudu (malé energie), můžeme jím nadálku zapínat a vypínat mnohonásobně větší proudy.

Stykače mívají nejen jeden, ale i více párů pomocných kontaktů, které propojují nebo rozpojují pomocné obvody ovládací, signalizační, blokovací atd. Nejčastěji bývají stykače vybaveny dvěmapáry pomocných kontaktů zapínacích a dvěma páry kontaktů vypínacích pro celkem 4 ovládací obvody. Pomocné kontakty jsou podobně jako hlavní kontakty s čelním stykem obvykle můstkové. [5]

4 Konstrukce zhášecí komory

Při konstrukci experimentálního modelu zhášecí komory bylo potřeba dbát především na tepelnou odolnost komory. Při opakujícím se testování bude v komoře vznikat elektrický oblouk, který ve svém jádru dosahuje teplot až 16000 °C (teplota obalu oblouku 6000-8000°C), proto při konstrukci bylo třeba vybírat materiály s dobrou tepelnou odolností. Model je po bocích a zvrchu co nejvíce otevřený, aby se co nejméně kumulovalo teplo a ionizovaný vzduch v komoře, i rošty zhášecí komory jsou ve svislé poloze pro lepší odvod tepla. Pro konstrukci zhášecí komory byla použita 3D tiskárna značky Průša, která tiskne na bázi tavení termoplastů což docela snižuje tepelnou odolnost komory. Proto byl pro tisk použit materiál PLA heat rezistace (viz kapitola 4.3), který po vytvrzení dosahuje nejlepších tepelně odolných vlastností ze všech materiálů pro tisk typu FDM.

Další důležitou podmínkou při konstrukci komory byla průhlednost předního krytu. Ten má skleněný výřez umožňující pohled do zhášecí komory s možností zavedení optické diagnostiky. Pohled u modelu komory byl bohužel asi z 50% zastíněn pólovým nástavcem magnetického obvodu.

Aby oblouk nezůstával mezi kontakty, ale pohyboval se směrem mezi rošty zhášecí komory, byly z vnějších stran modelu nainstalovány pólové nástavce, které vytvářejí magnetické pole pomocí permanentních neodymových magnetů. Určení polarity magnetů bylo provedeno jednoduchou metodou, a to pomocí kompasu. Dále byl přidán tzv. "arc runner" (vodivá dráha), který pomáhá oblouk vést po přesné dráze mezi žebra zhášecí komory.

4.1 Úprava stykače

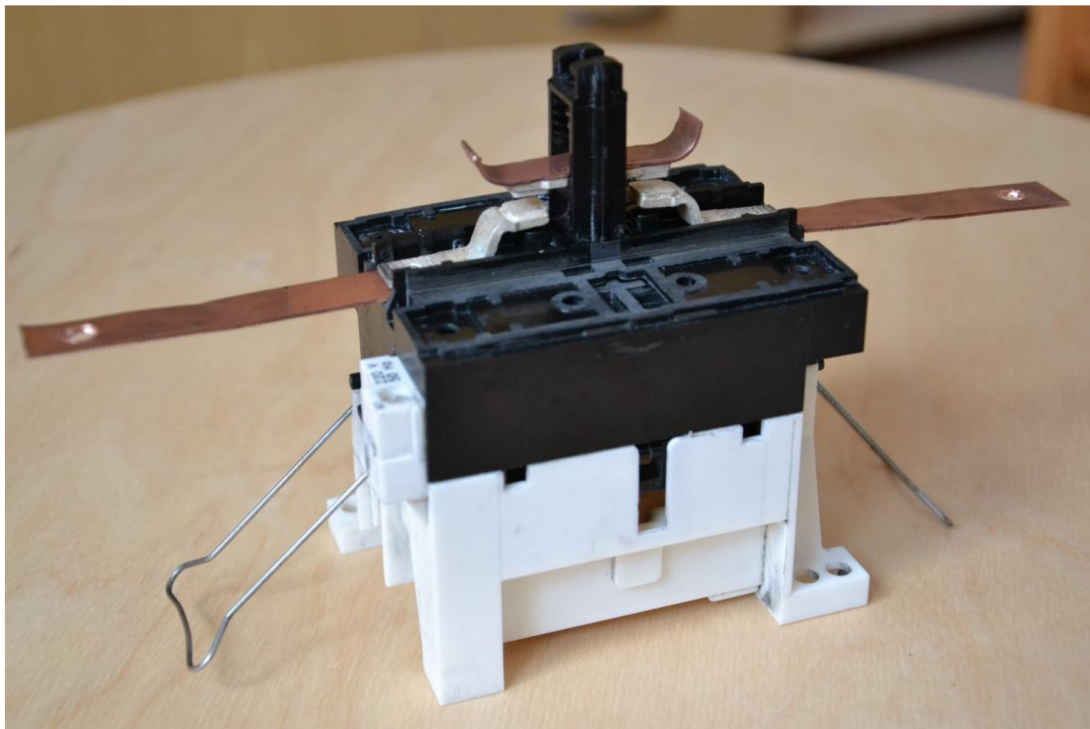
Pro prototyp zhášecí komory byl vybrán kontaktní systém staršího typu třífázového stykače (220V), který byl původně určen pro spínání třífázového obvodu střídavého proudu. Ovládání spínání u stykače zajišťuje elektromagnetický mechanismus, který spíná pomocí kontaktního můstku dva oddělené kontakty. Při vypínacím ději vznikají tedy dva oblouky (viz kapitola č.3). Aby bylo možné tento

stykač použit pro experimentální zhášecí komoru (určenou pro stejnosměrný oblouk), musel projít menšími úpravami.

Provedené úpravy:

- Odstranění vrchního krytu, který obsahoval šest zhášecích komor pro všechny tři fáze. Zhášecí komory obsahovaly kovové rošty.
- Odstranění dvou kontaktních můstků a jejich přilehlých kontaktů. Návrh zhášecí komory je určen pro jednofázový obvod stejnosměrného proudu.
- Obroušení jednotlivých plošek a úchyťů po odstraněných dvou fázích.
- Prodloužení připojovacích kontaktů, pro snadnější připojení k obvodu při zkoušce na zkratovně.
- Úprava kontaktního můstku pomocí měděného plíšku, pro lepší pohyb oblouku mezi rošty.

Po následných úpravách vznikl stykač s jedním kontaktním můstkem, pro který se mohla začít navrhovat zhášecí komora určitých rozměrů.

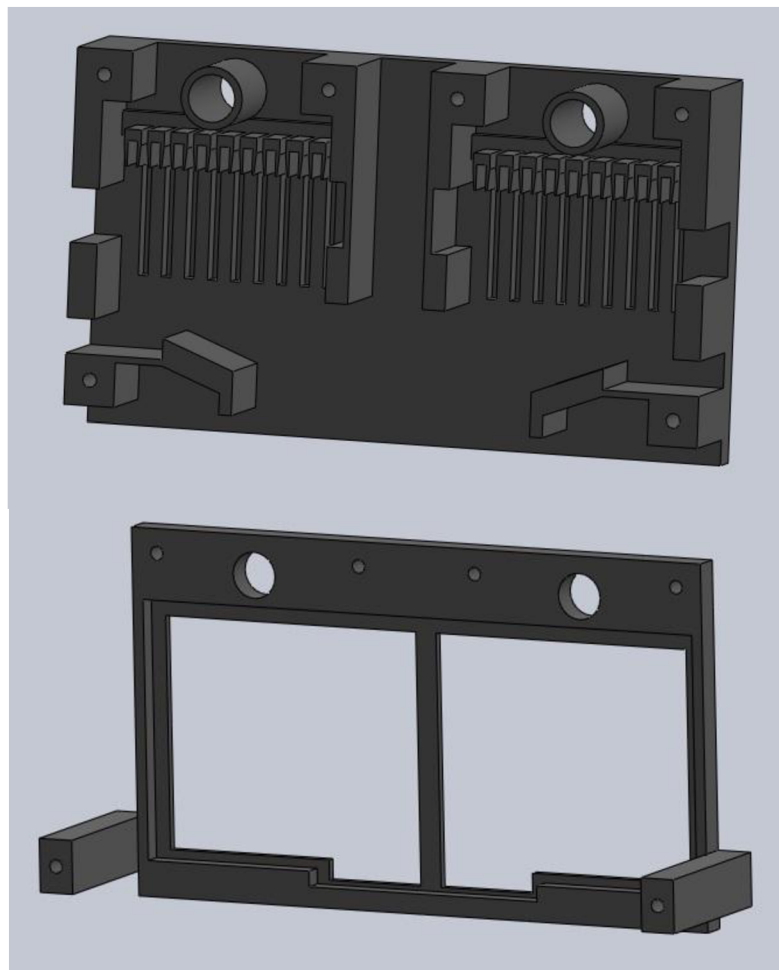


Obr. 4.1 -1 Finální podoba stykače po úpravě

4.2 Konstrukce modelu pomocí 3D tisku

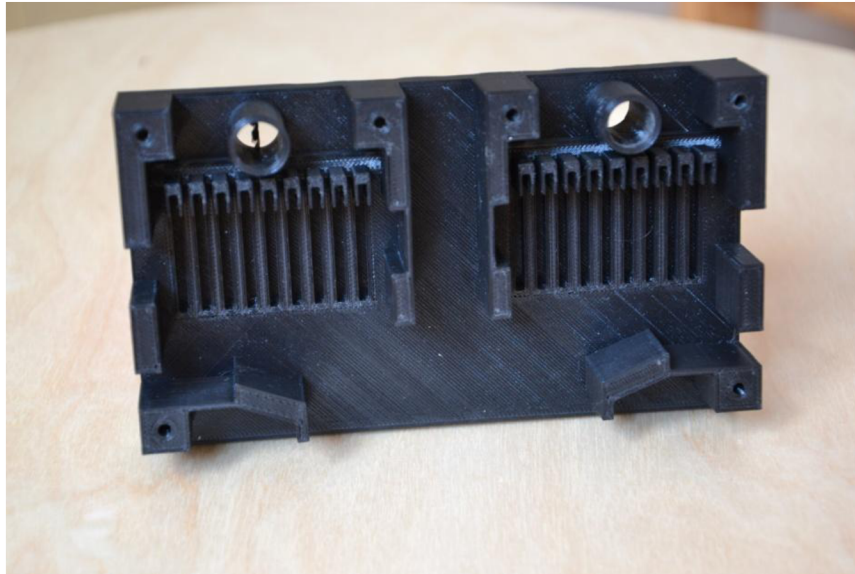
Protože kontaktní systém stykače je malých rozměru (velikost můstku: 20 mm, vzdálenost mezi rozepnutými kontakty: 6 mm), bylo třeba při konstrukci zhášecí komory dosáhnout určité přesnosti a preciznosti, kterou umožňuje tisk modelů pomocí 3D tiskárny.

Z rozměrů stykače byl vytvořen dvojdílný model zhášecí komory v návrhovém 3D softwaru SolidWorks 2016 (viz obr.4.2-1). Díky softwaru bylo možné s přesností navrhout veškeré detailní tvary zhášecí komory, jako například drážky pro usazení roštů zhášecí komory s přesným rozestupem mezer mezi rošty, díry pro závity nebo podpory pro vodivé části komory.



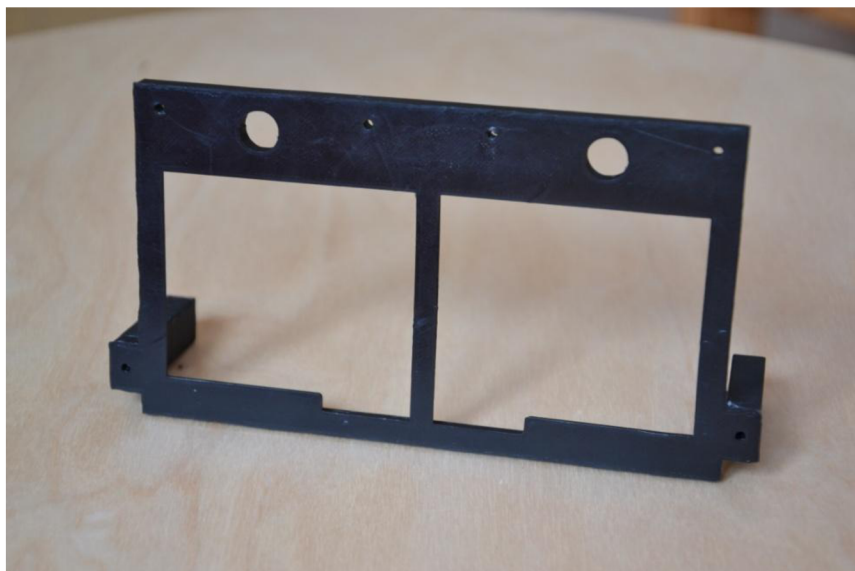
Obr. 4.2 - 1 Navrhnutý 3D model v softwaru SolidWorks 2016

Pomocí 3D tisku byla nejprve vytvořena základní konstrukce viz (obr. 4.2-2), která se skládá ze zadní stěny zhášecí komory, ta dále obsahuje drážky pro žebra



Obr. 4.2 - 2 První základní část modelu zhášecí komory

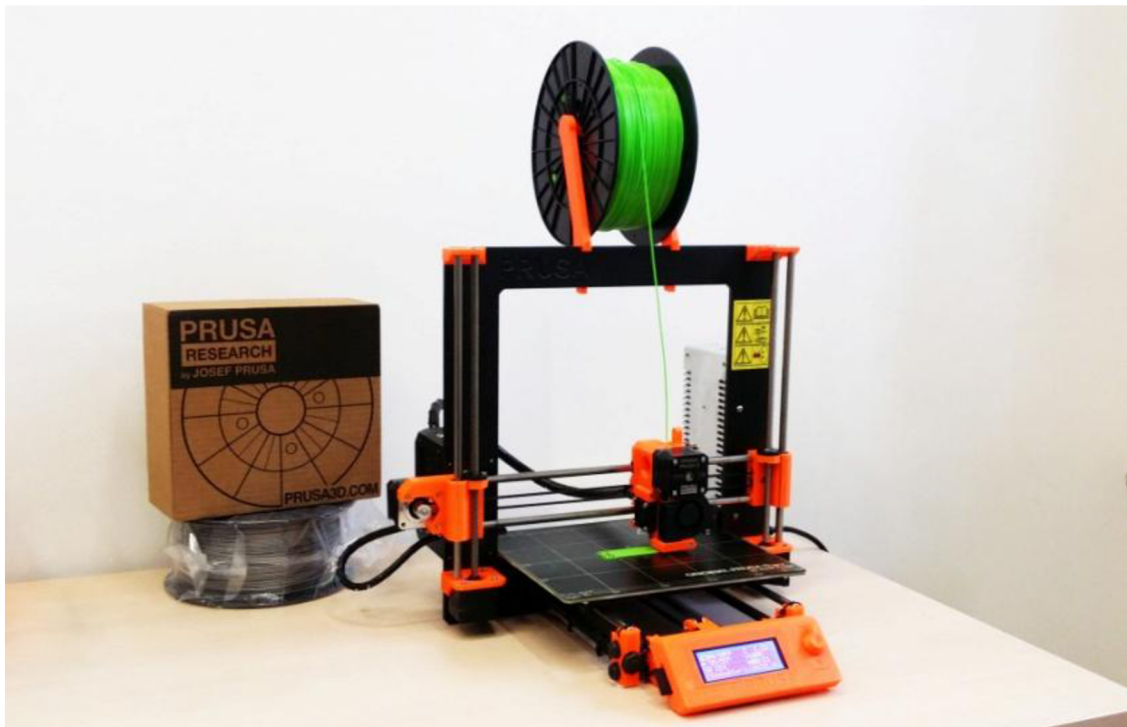
dvou zhášecích komor, podpory pro vodivé části (arc-runner), pouzdra pro permanentní neodimové magnety, distanční podpory pro dodržení tloušťky zhášecí komory, díry pro závity vrutů. Dále byl sestrojen kryt zhášecí komory viz (obr. 4.2 - 3) s výřezem pro sklo, díky kterému bylo pak možné pozorovat děje při zhášení oblouku v komoře.



Obr. 4.2 - 3 Druhá část modelu - krytka s výřezem pro sklo

4.2.1 3D tiskárna Průša i3 MK2S a její princip

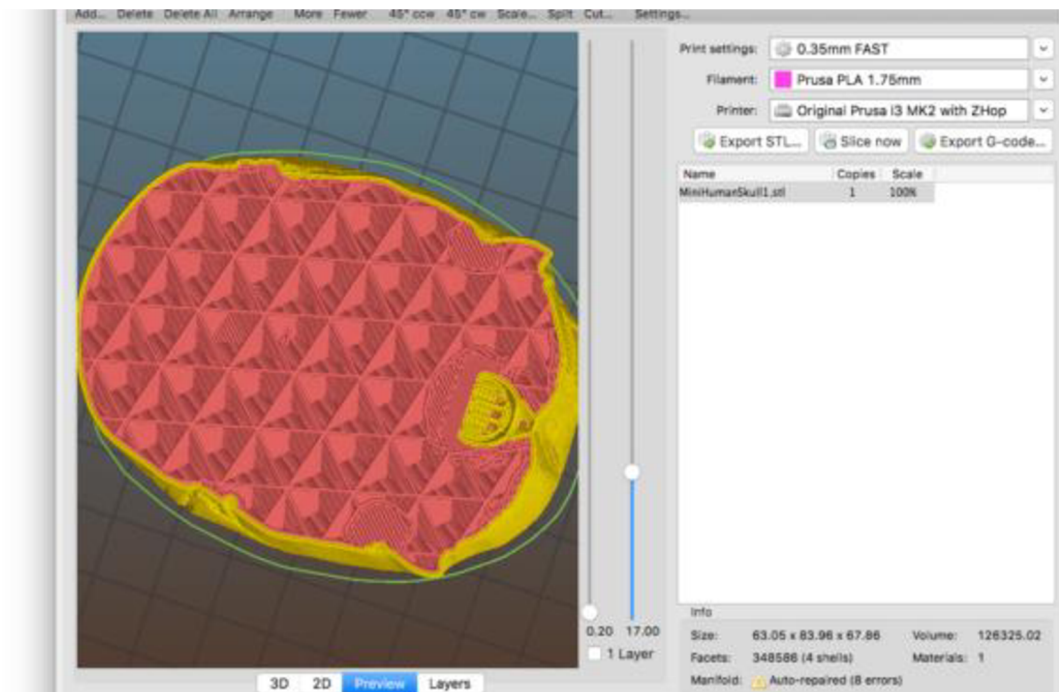
Tiskárna značky Průša, typ i3 MK2S pro výrobu 3D modelů (obr.4.2.1 - 1) pracuje na principu rozložení počítačového modelu do tenkých vrstev a jejich následném sestavení do reálného modelu v pracovním prostoru tiskárny. Jedná se o additivní proces, tzn. že na rozdíl od klasického obrábění se materiál neubírá, ale naopak je po vrstvách přidáván. Model je stavěn na základní desce, která je vyhřívána, aby materiál lehce přilnul a stabilně držel svoji pozici. Tiskárna použita pro tisk modelu komory pracuje na FDM principu, tj. objekt vzniká vrstvou po vrstvě natavováním tenkého proužku termoplastového materiálu v trysce. Tryska natavuje materiály v rozmezí teplot od 100-300°C a je součástí posuvné hlavy (3 osy: x, y, z) obsahující navíjecí mechanismus, který odvíjí tiskovou strunu z cívky a vtlačuje materiál do trysky. Tryska má průměr 0,4 mm a dokáže nanášet vrstvy tloušťky 0,05 mm



Obr. 4.2.1 -1 3D tiskárna Průša



U 3D tiskárny Průša i3 MKS2 je třeba zmínit i její software Slicer Prusa Edition, díky kterému se nastavují jednoduše a detailněji parametry tisku a modelu. Jednoduché a srozumitelné rozhraní programu můžete vidět na (obr.4.2.1-2).



Obr. 4.2.1 -2 Software Slicer Prusa Edition

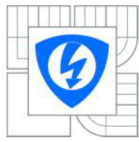
Nastavitelné parametry:

- Rychlost posuvu trysky
- Teplota trysky
- Teplota vyhřívání desky
- Počet vrstev vnějších stěn modelu
- Hustota vnitřní výplně modelu
- Konkrétní nastavení pro určitý typ materiálu

4.3 Použité materiály pro konstrukci

Tepelně odolná tisková struna PLA:

Materiál byl použit pro konstrukci zážehové komory pomocí 3D tisku. Materiál PLA (polyaktid) je bioplast, který je zcela ekologicky nezávadný. Jedná se o termoplast a je nejvhodnější pro 3D tisk. Vytisknutý model z tohoto materiálu je třeba nechat vytvrdit při 80-100°C po dobu asi 60 min., aby dosahoval požadované tepelné odolnosti až 130°C, kdy stále drží svůj tvar.



Teplotní nastavení 3D tiskárny pro PLA materiál: teplota trysky 215°C; teplota podložky 50°C.

Polytetrafluoretylen - teflon (PTFE):

Tento elektroizolační a vysoce tepelně odolný plast byl použit na rošty zhášecí komory, v důsledku přímého styku s obloukem. Je stabilní v rozmezí teplot od -260°C do 250°C. PTFE patří mezi nejméně hořlavé plasty. Při zahřívání na vzduchu bez plamene nezačne hořet do teploty 575°C. Materiál má velmi dobré elektroizolační vlastnosti, které jsou jen málo závislé na teplotě a frekvenci. Elektrická pevnost je vyšší než 10 kV/mm. Měrný povrchový odpor dosahuje hodnot řádově vyšších než 10¹⁰ ohm a měrný vnitřní odpor vyšších než 10¹³ ohm.cm.

Křemičité sklo (SiO₂):

Jedná se o klasické sklo obsahující oxid křemičitý (SiO₂), které se vyznačuje zejména relativně vysokou propustností světla v části viditelného spektra, což je ideální pro zkoumání dějů ve zhášecí komoře pomocí optické diagnostiky.

Měď (Cu):

Ve zhášecí komoře je použita jako dráha, která vede oblouk mezi rošty komory a prodloužení připojovacích kontaktů. Měď je známá svou tepelnou vodivostí (dosahuje až 387 W/mK) a dobře vede elektrický proud.

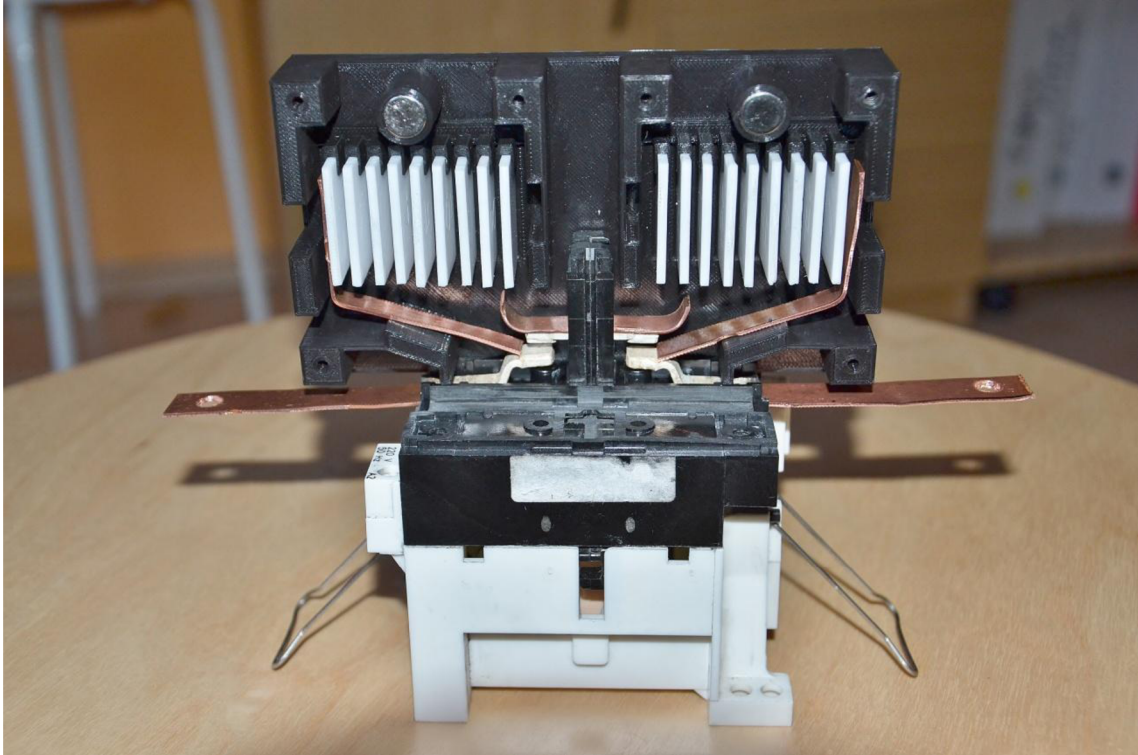
Ocel třídy 10:

Jedná se o kov, který vyniká magnetickou vodivostí, jeho negativum je, že snadno podléhá korozi. Materiál byl použit pro magnetický obvod zhášecí komory jako pólové nástavce.

Neodimové magnety (NdFeB):

Jsou to permanentní magnety s největší energií. Ku příkladu magnet o průměru Ø 10 mm, výška 4 mm, udrží těleso o hmotnosti 2,1 kg. Další jejich výhodou je nízká cena, dříve specifikovaný magnet stojí přibližně 0,5-1 Kč,-. Díky těmto vlastnostem jsou ve zhášecí komoře zdrojem magnetického pole pro pólové nástavce.

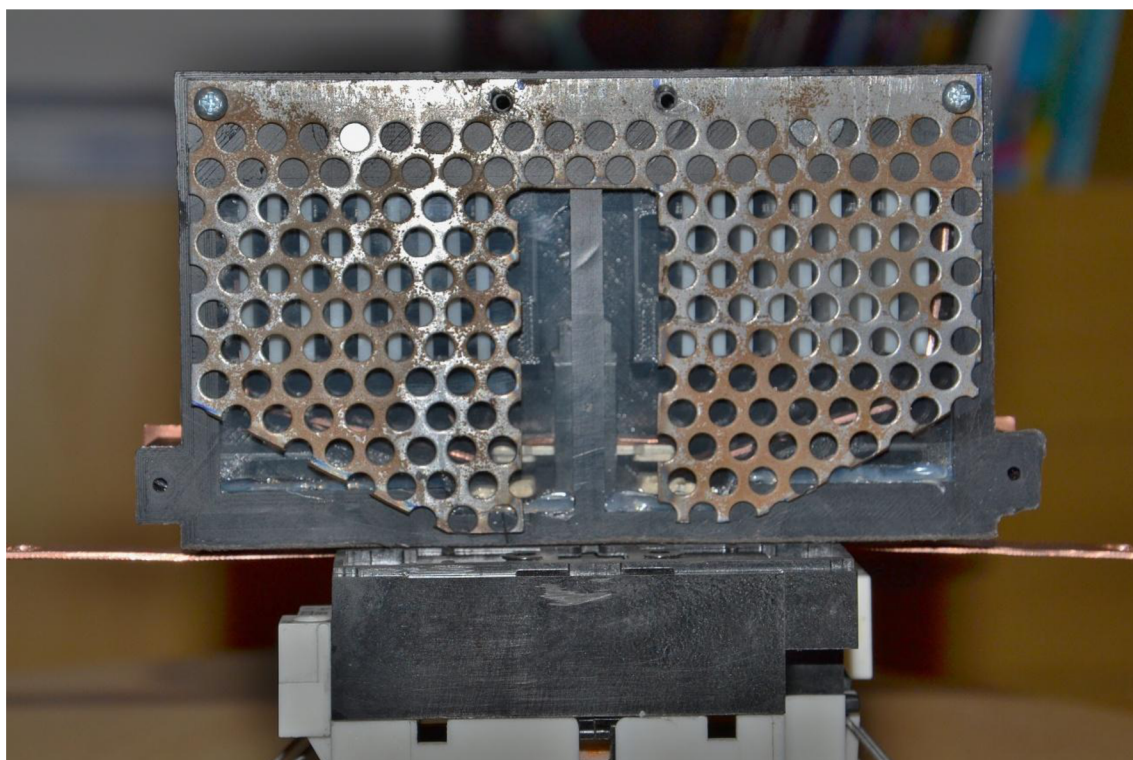
4.4 Fotodokumentace zhášecí komory



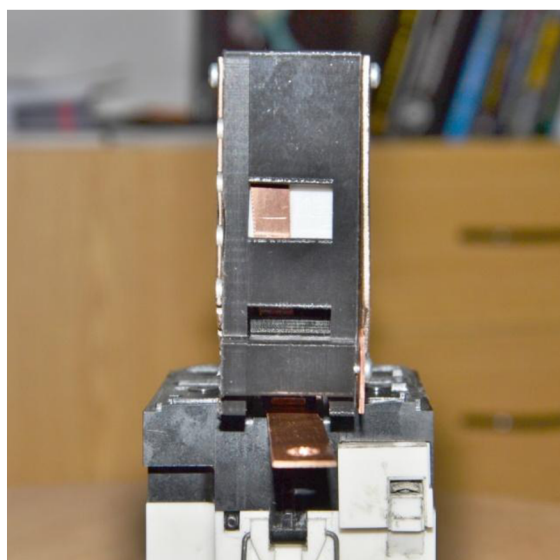
Obr. 4.4 - 1 Pohled do modelu izolační zhášecí komory



Obr. 4.4 - 2 Magnetický obvod (samostatně)



Obr. 4.4 - 3 Přední průhledný krytzhášecí komory



Obr. 4.4 - 4 Boční stěna komory (obr- vlevo); zadní stěna komory (obr - vpravo)



5 Vyhodnocení testování zhášecí komory

Testovací zkoušky zhášecí komory probíhaly na zkratovně ve Vědecko-technickém parku profesora Lista. Jako zdroj napětí byl využit synchronní generátor. Protože testovaný přístroj spadá do kategorie nízkého napětí (nejvyšší napětí, které přístroj podstoupil bylo 350V), byl proto generátor udržován v určitých otáčkách pomocí asynchronního motoru a měnilo se pouze budící napětí pomocí budiče, který je připojen k rotoru generátoru sběrnými kroužky.

Na přístroji bylo provedeno celkem 48 testů, které byly zaměřeny především na vypínací schopnosti stykače při určitém napětí a proudu. Cílem testování bylo zjistit, do jakých mezí napětí a proudu bude přístroj bezpečně vypínat procházející proud - účinně zhášet oblouk v navržené zhášecí komoře. Všechny testy byly zaznamenávány pomocí vysokorychlostní kamery Photron Fastcam SA-X2, která dokáže zaznamenávat rychlostí až 1 000 000 snímků za sekundu. Pro zaznamenání průběhu oblouku bylo využito 12 500 snímků za sekundu a na kameře použit objektiv Nikon 18-105mm. K lepšímu nasvícení objektu bylo také použito doplňkové LED světlo. Kvůli bezpečnosti bylo testování ovládáno z velína zkratovny a veškerá výstupní data zkoušky byla zaznamenána pomocí počítačového softwaru, kterým velín disponuje.

Při prvních dvanácti testech byla chybně uspořádána polarita permanentních magnetů v magnetickém obvodu, což byla závažná chyba. Oblouk nebyl vtahován do prostoru mezi žebra, ale naopak vytlačován magnetickým polem do prostoru mezi kontakty. Po správném uspořádání magnetické polarity, oblouk se již pohyboval žadáným směrem.

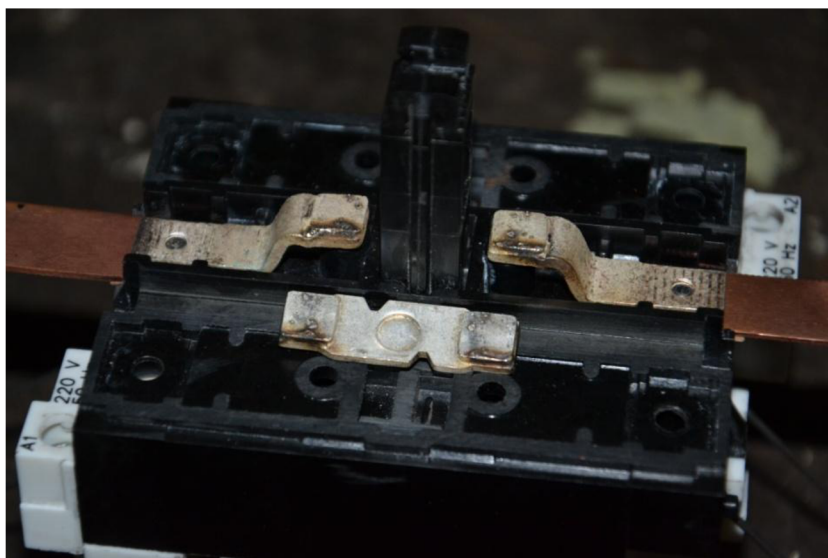
Přístroj byl testován ve dvou nastaveních. První nastavení můžete vidět na obrázku 4.4 - 1. Zde komora obsahuje plný počet zhášecích roštů tj. pro každý kontakt 9 kusů (celkem 18 kusů). Velký počet roštů a malé rozestupy mezi nimi zapříčinily, že oblouk se obtížně dostával mezi rošty a neprodužoval se. Dalším problémem byl tvar arc-runneru na kontaktním můstku. Oblouk obtížně na arc-runner přecházel a ve většině případů se zdržoval na kontaktním můstku.

Druhé nastavení zhášecí komory mělo ke každému kontaktu 5 kusů (celkem 10 kusů) roštů. Vznikly tedy mezi rošty větší rozestupy a oblouk se snadněji mezi ně dostával. Arc-runner na kontaktním můstku byl odstraněn a nahrazen novým z tenšího měděného materiálu (viz obr. 5.1). Kopíroval lépe tvar kontaktního můstku a oblouk snadněji na arc-runner přecházel.



Obr. 5.1 Upravený arc-runner

Opakující testování se především projevilo na kontaktech stykače (viz obr. 5.2), kde je jasně viditelné opotřebení kontaktů natavováním materiálu nežadoucím vlivem oblouku. Dále oblouk poškodil jen lehce sklo v okolí kontaktů a zanechal slabě viditelné stopy na arc-runneru. Zbylé části komory nebyly téměř poškozené.



Obr. 5.2 Opotřebení kontaktů stykače



5.1 Vyhodnocení konkrétních testů

Pro detailní vyhodnocení testů byly vybrány následující záznamy průběhů a kamerových snímků, které naleznete v příloze této práce.

Vyhodnocení průběhů 1A, 2A, 3A, 4A, 5A v příloze obsahují:

- tabulku s označením testu
- tabulku s parametry napětí a proudu
- tabulku okolních podmínek v laboratoři
- tabulku vyhodnocených veličin
- graf průběhu napětí a proudu
- detail průběhu napětí a proudu vypínacího pochodu

Test č.10 - zhašení oblouku (špatná polarita magnetického pole):

Při testu č.10 je na snímcích pořízených z vysokorychlostní kamery (viz příloha 1B) nejlépe vidět chyba otočené magnetické polarity. Oblouky vznikají na hranách styčných ploch a postupně se přibližují směrem k sobě. Jednalo se o nežádoucí jev, který byl vyřešen tak, že se změnil směr stejnosměrného proudu přehozením přívodních kabelů.

Z vyhodnoceného průběhu vypínacího pochodu v příloze 1A lze vidět na průběhu napětí a proudu, že i přes špatně nastavenou polaritu došlo k vypnutí obvodu. Vypínací čas se rovnal 4,08 ms při napětí 61 V a proudu 164 A.

Test č.18 - zhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)

Při testu č. 18 je na snímcích pořízených z vysokorychlostní kamery (viz příloha 2B) vidět, jak oblouk na pravé straně nemá možnost prodloužit svoji délku, protože rošty mají mezi sebou malé rozestupy.

Z vyhodnoceného průběhu vypínacího pochodu v příloze 2A lze pozorovat na napěťovém vypínacím průběhu malý šum, což dokazuje že oblouk byl v menší míře vtažen mezi rošty. Vypínací čas se rovnal 11,2 ms, při napětí 306 V a proudu 144 A.

Test č.19 - nezhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)

Při testu č. 19 je na snímcích pořízených z vysokorychlostní kamery (viz příloha 3B) vidět znovuzapálení oblouku, které přechází v trvalé hoření mezi kontakty.

Z vyhodnoceného průběhu vypínacího pochodu v příloze 3A lze vidět, že na vypínací průběh napětí nenavazuje zotavené napětí zdroje. Znamená to, že přístroj se zhášecí komorou oblouk nezhasl, ale obvod vypnul systém zkratovny. Vypínací čas se rovnal 21,74 ms při napětí 314 V a proudu 144 A.

Test č.27 - zhašení oblouku (zhášecí komora s úpravou)

Při testu č. 27 je na snímcích pořízených z vysokorychlostní kamery (viz příloha 4B) vidět, jak oblouky se nejdříve prodlužují po dráze arc-runneru a následně k dalšímu prodloužení dochází mezi rošty zhášecí komory (viz obr. 5.1.1). Komora v tomto testu byla upravená. Došlo ke zvětšení rozstupů mezi žebry a výměně arc-runneru na kontaktním můstku za lépe tvarovaný. Oblouk snadno a rychle přešel z kontaktů na pomocné arc-runnersy.



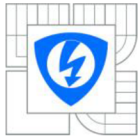
Obr. 5.1.1 Prodlužování oblouků mezi rošty komory

Z vyhodnoceného průběhu vypínacího pochodu v příloze 4A lze vidět téměř hladký nárůst napětí na napěťovém průběhu, což je v rozporu se snímkem z vysokorychlostní kamery, protože je viditelný vstup oblouku mezi rošty. Vypínací čas se rovnal 10,56 ms při napětí 340 V a proudu 150 A.

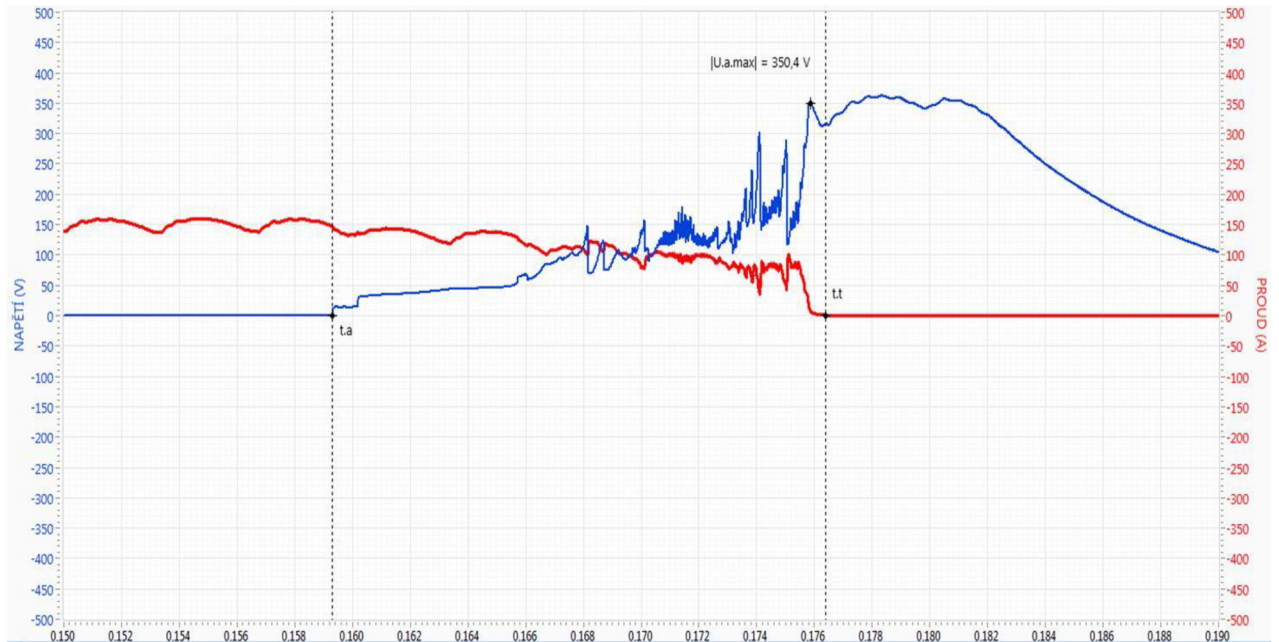
Test č.28 - zhašení oblouku s maximální hodnotou proudu a napětí (komora s úpravou)

Při testu č. 28 je na snímcích pořízených z vysokorychlostní kamery (viz příloha 5B) vidět znovuzapalování oblouku a kumulování ionizovaného prostředí v pravé zhášecí komoře. Na snímcích lze také pozorovat části odpařeného materiálu.

Z vyhodnoceného průběhu vypínacího pochodu v příloze 5A lze pozorovat výrazný šum na vzrůstajícím napěťovém průběhu (viz obr. 5.1.2), který je důkazem toho, že docházelo ke znovuzapalování a oblouk se dostal mezi rošty.



Na konci napěťového vzrůstu lze vidět zotavené napětí zdroje. To znamená, že přístroj samostatně vypnul obvod. Hodnoty vypínaného proudu a napětí byly nejvyšší ze všech testů. Další zvyšování parametrů napětí a proudu by už mohlo narušit konstrukci přístroje. Proto z důvodu zachování experimentálního prototypu zhášecí komory bylo při těchto hodnotách testování ukončeno. Vypínací čas se rovnal 17,02 ms, při napětí 350 V a proudu 150 A.



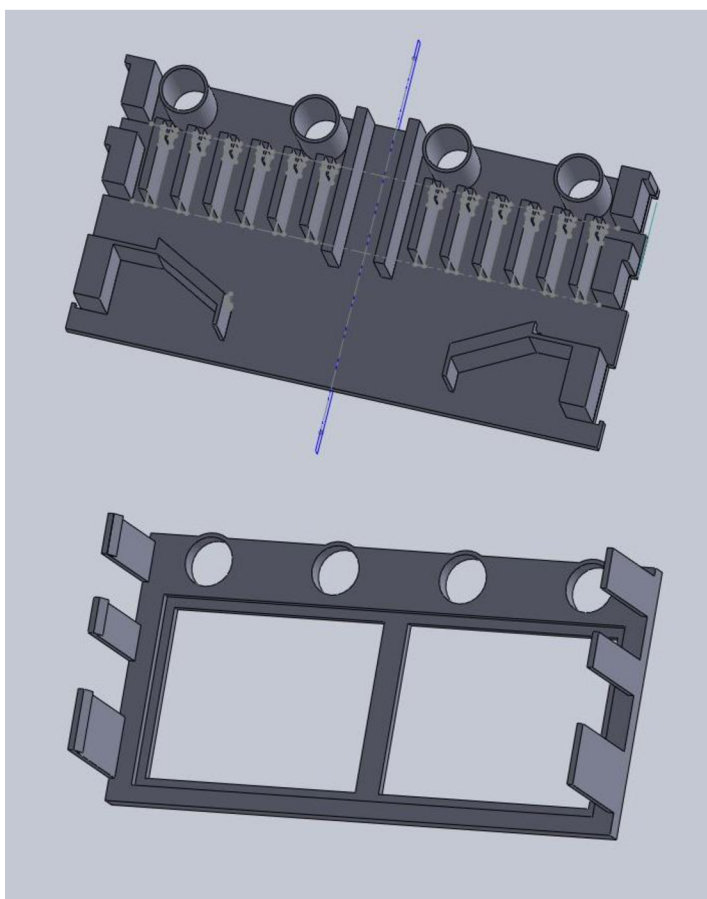
Obr. 5.1.2 Detail vypínacího průběhu napětí a proudu

6 Návrhy konstrukčních řešení pro zlepšení parametrů komory

Pro budoucí zlepšení funkčnosti a technických parametrů experimentální zhášecí komory na základě získaných poznatků z provedeného testování, jsou navrženy tyto konstrukční vylepšení:

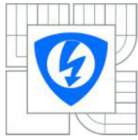
Konstrukce komory:

Pro zhotovení konstrukce komory bude nejlepší opět využít 3D tisk, díky jeho přesnosti. Materiál tiskového filámentu PLA Heat Rezistace se osvědčil vůči vlivům oblouku jako dostatečně odolný. Komoru je třeba snížit v její výšce, aby permanentní magnety jako zdroj magnetického pole pro vyfukování oblouku byly co nejbližší kontaktnímu mechanismu.



Obr. 6.1 Návrh konstrukce komory

Pro zjednodušení kompletace budou zkonstruovány 3D tiskem výstupky z krytu (viz obr. 6.1), které snadno zapadnou a zachytí se do základní konstrukce komory.



Počet žebër pro jednu část kontaktního ústrojí bude omezen z 9 kusů na 6 kusů, aby se zvětšil rozestup mezi žebry. Podpory pro arc-runners zůstanou na stejném místě, akorát se v nich vytvoří úchytové drážky pro snadnější a stabilnější upevnění. Poslední úpravou v konstrukci je vytvoření dalších dvou válcových pouzder pro magnetický obvod.

Magnetický obvod:

Pro účinnější zhášení oblouku je třeba zesílit zdroj magnetického pole. To se uskuteční tím způsobem, že místo dvou tyčových magnetů, na které navazovaly pólové nástavce se použijí čtyři plné neodymové magnety o průměru 10 mm a délce 30 mm, které budou umístěny v pouzdrech konstrukce (viz obr. 6.1). Tvar feromagnetických pólových nástavců zůstane stejný, akorát pro testování vrchních krajních schopností zhášení by bylo třeba zhotovit místo děrovaného předního nástavce, nástavec plný tloušťky stejné jako nástavec zadní tj. 2 mm. Pro pólové nástavce by bylo vhodnější využít feromagnetickou ocel vyšších tříd, aby nepodléhaly korozi.

Kontaktní systém:

Z důvodů nízké kapacity a rychlého oteplování materiálu kontaktů je potřeba celkově zvětšit rozměry kontaktů, aby lépe odolávaly tepelným vlivům oblouku.

Arc-runners:

Pomocné vodící dráhy nebo-li arc-runners je potřeba vyrobit s větší přesností, aby komora celkově dosahovala určité symetrie na obou stranách. Vzniklé dva oblouky se budou poté s větší pravděpodobností protahovat symetričtěji. Přítlak pomocných arc-runnerů na kontakty musí dosahovat určité síly, aby při spínacích procesech co nejméně odskakovaly.



7 Závěr

Pro analýzu zhášení stejnosměrného oblouku byl zhotoven model experimentální zhášecí komory vhodný pro upravený elektromagnetický stykač. Výhodou tohoto modelu je možnost výměny roštů zhášecí komory v důsledku opotřebení opalováním, nebo pro otestování různých izolačních materiálů. U modelu lze také měnit i počet roštů a zvětšovat tím tak vzdálenost mezi žebry, této možnosti bylo využito při testování.

Při konstrukci nastaly největší potíže s 3D tiskem kvůli tepelně odolným materiálům. Jako první byla použita tisková struna z polyamidu (nylon), která nejspíše nebyla skladována v suchých prostorech (materiál snadno absorbuje vlhkost), což mělo za následek ucpávání a pění materiálu v trysce. Tisková struna byla vysušena v troubě a tiskárna už potom bez problému zvládla vytisknout první základní část modelu, nicméně materiál se po konci tisku a postupném chladnutí podložky smrštil na délce 100 mm o 5mm. Model byl tedy rozměrově zcela odlišný oproti návrhu a navíc v důsledku smrštění nevykazoval žádnou pevnost mezi vrstvami tisku. Se strunou PLA Heat resistance byl tisk už naprosto bezproblémový, ale bylo potřeba nechat materiál po tisku vytvrdit v troubě při 80-100°C. Při vytvrzování byla nejspíše přesažena dovolená teplota, proto se model zvlnil a byl opět nepoužitelný. Poté, co se podařilo zhotovit konstrukci pomocí 3D tisku, postup konstrukce byl již bez problémů, co se týče magnetického obvodu, roštů, vodivých částí atd.

Po otestování parametrů zhášecí komory stejnosměrného oblouku (navržené pro stykač) vyšlo najevo mnoho faktorů, které ovlivňovaly zhášecí schopnosti přístroje jako celku. Komora dosáhla nejlepších zhášecích parametrů, když mezi rošty byly větší vzdálenosti, oblouk se pak lépe prodlužoval a ochlazoval. Vodící dráhy oblouku nebo-li arc-runners se osvědčily v tom, že se po nich oblouk dostával rychleji z kontaktů přesně směrem mezi rošty. K dobré zhášecí schopnosti přispíval svojí funkcí také druhý nově upravený arc-runner, který oproti původnímu lépe přiléhal a tak snadněji odváděl z kontaktů oblouk. Po úpravách komory přístroj dokázal vypnout stejnosměrný proud 150 A o napětí 350 V s vypínacím časem 17,02 ms. Z bezpečnostního hlediska by přístroj měl vypínat do 20 ms, což testovaný stykač se zhášecí komorou splnil. Při napětí 340 V a proudu 150 A se vypínací čas dostal pod hranici 11 ms.

V kapitole č.6 jsou navržena zlepšení, které by po následné realizaci měly napomoci zhášecí komoře dosáhnout lepších zhášecích schopností.



Seznam literatury

- [1] VÁVRA, Zdeněk, Vladimír NOVOTNÝ a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Stavba elektrických přístrojů II: určeno pro posl. fak. elektrotechn.* Brno: VUT, 1985. Učební texty vysokých škol.
- [2] DELONG, Armin a Vladislav MUSIL. *Elektronová a iontová technika.* Brno: Vysoké učení technické, 1987.
- [3] AUBRECHT, V. *Fyzika a diagnostika plazmatu (přednášky VEE 07-086).* Brno: 2007. 118 (s.)
- [4] KULHÁNEK, Petr. *Blýskání, aneb, Třináctero vyprávění o plazmatu.* Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-3-9.
- [5] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje I: určeno pro posl. elektrotechn. fak.* Praha: SNTL, 1974.



Přílohy

- 1A) Test č.10 - zhašení oblouku (špatná polarita magnetického pole)
- 2A) Test č.18 - zhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)
- 3A) Test č.19 - nezhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)
- 4A) Test č.27 - zhašení oblouku (zhášecí komora s úpravou)
- 5A) Test č.28 - zhašení oblouku s maximální hodnotou proudu a napětí
(komora s úpravou)
- 1B) Test č.10 - zhašení oblouku (špatná polarita magnetického pole)
- 2B) Test č.18 - zhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)
- 3B) Test č.19 - nezhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)
- 4B) Test č.27 - zhašení oblouku (zhášecí komora s úpravou)
- 5B) Test č.28 - zhašení oblouku s maximální hodnotou proudu a napětí
(komora s úpravou)

1A) Test č.10 - zhašení oblouku (špatná polarita magnetického pole)

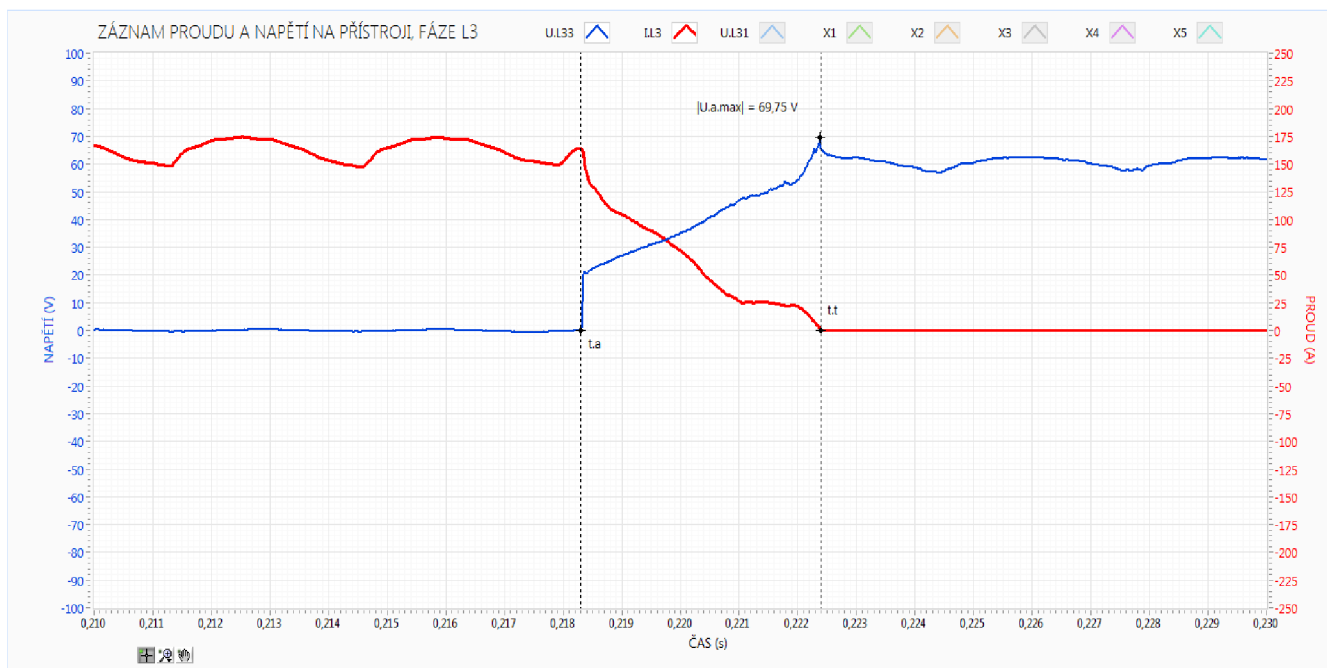
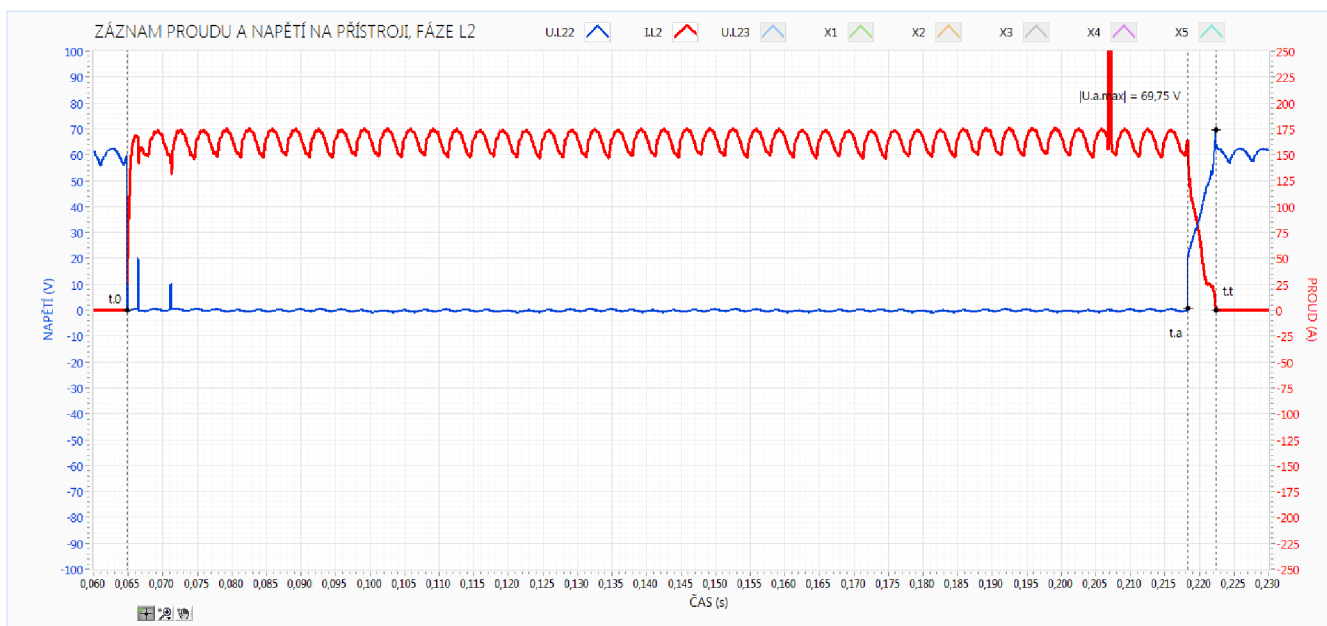
Označení	Test provedl	Vyhodnotil	Datum a čas měření	Reference of voltage and current calibration
DC_contactor_PLA_16 mm_mag-T	Simek, David	Černohorský, Petr	26.02:2018 11:14	2017-10-05-023/2018-01-31-005

Napětí	Proud	Tau	Typ testu	Trigger	Zdroj	Systém
61 V	164 A	0,26 ms	O	STATIC	GS1	DC-23

Teplota okolí	Vlhkost	Rosný bod	Tlak
22,4 °C	10,6 %	-9,8 °C	987 hPa

Vyhodnocené veličiny:

	I ² .t [k(A ² s)]	I ² .t.a [k(A ² s)]	I ² .t.p [k(A ² s)]	I.max [kA]	U.a.max [V]	Wa [kJ]	t.t [ms]	t.a [ms]	t.p [ms]
L2	4,14	0,02	4,12	0,31	69,75	0,01	157,56	4,08	153,48



2A) Test č.18 - zhašení oblouku (zhašecí komora bez úprav)

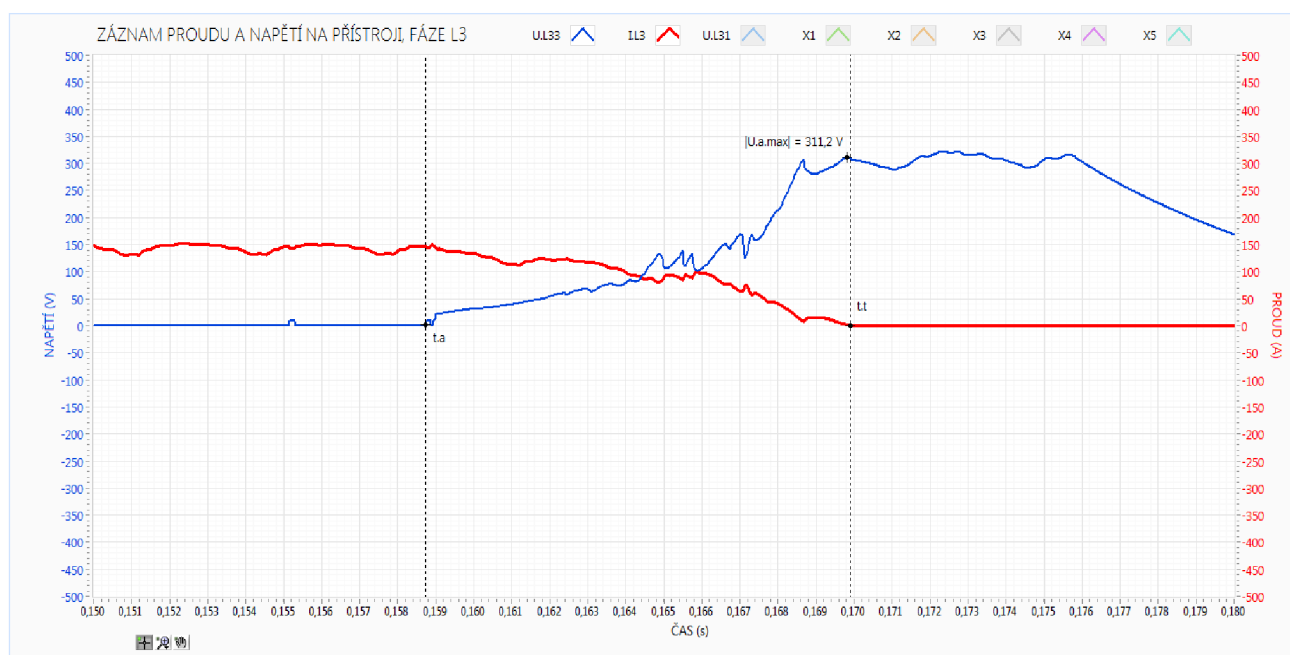
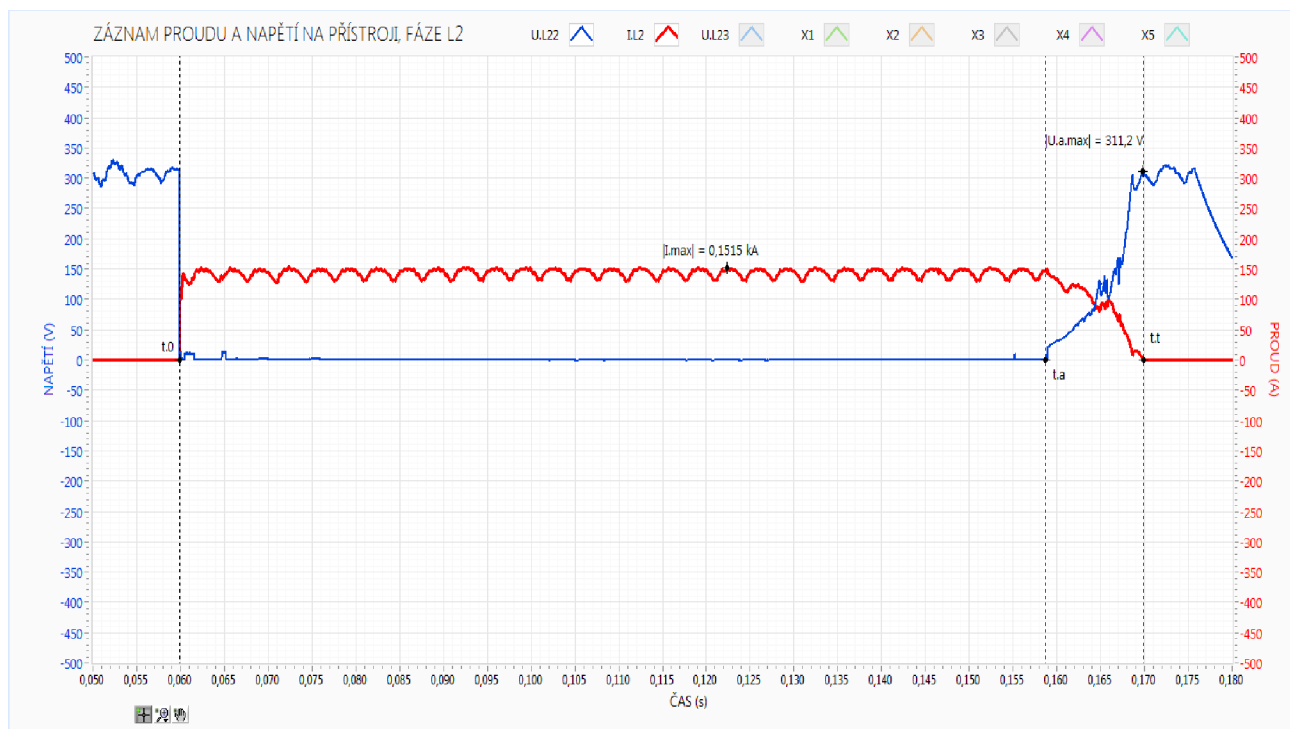
Označení	Test provedl	Vyhodnotil	Datum a čas měření	Reference of voltage and current calibration
PLA_16mm_mag_rever se_polarity-T	Dostal, Lukas	Simek, David	12:03:2018 13:07	

Napětí	Proud	Tau	Typ testu	Trigger	Zdroj	Systém
306 V	144 A	0,05 ms	O	STATIC	GS1	DC-23

Teplota okolí	Vlhkost	Rosný bod	Tlak
18,8 °C	42,9 %	5,9 °C	962,2 hPa

Vyhodnocené veličiny:

	$I^2 \cdot t$ [k(A ² s)]	$I^2 \cdot t_a$ [k(A ² s)]	$I^2 \cdot t_p$ [k(A ² s)]	I.max [kA]	U.a.max [V]	Wa [kJ]	t.t [ms]	t.a [ms]	t.p [ms]
L2	2,14	0,11	2,03	0,15	311,19	0,08	110,04	11,2	98,84



3A) Test č.19 - nezhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)

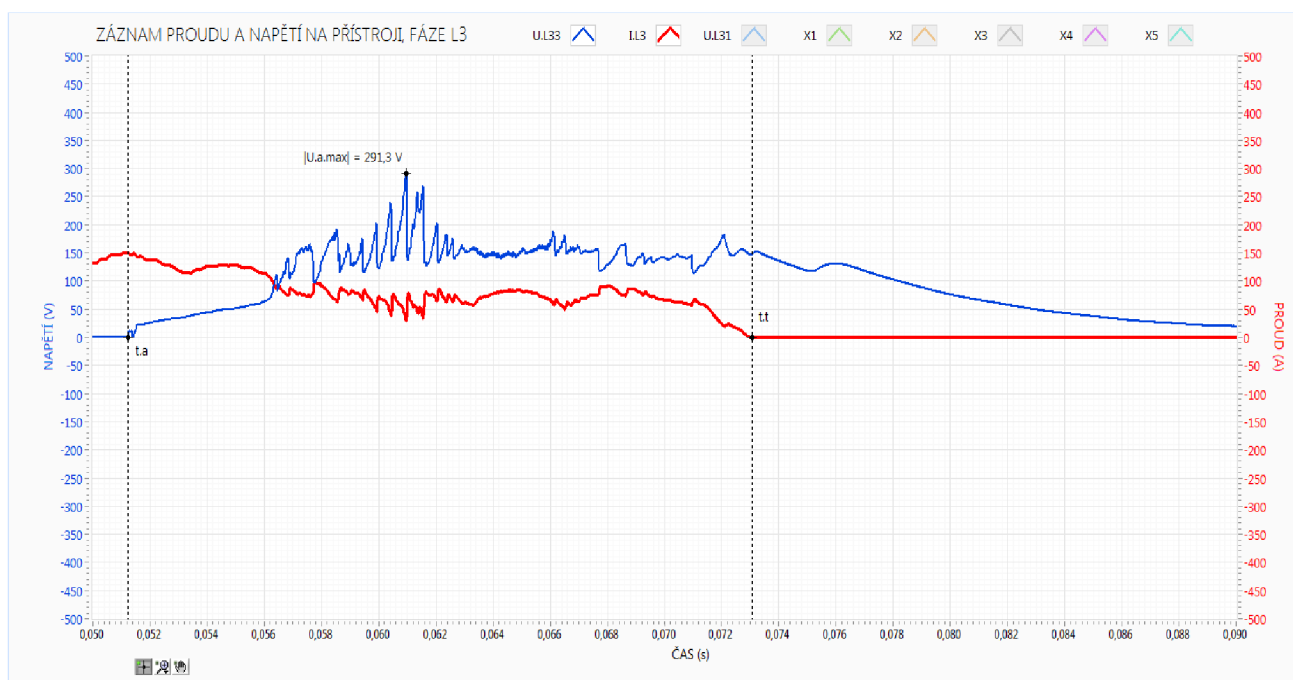
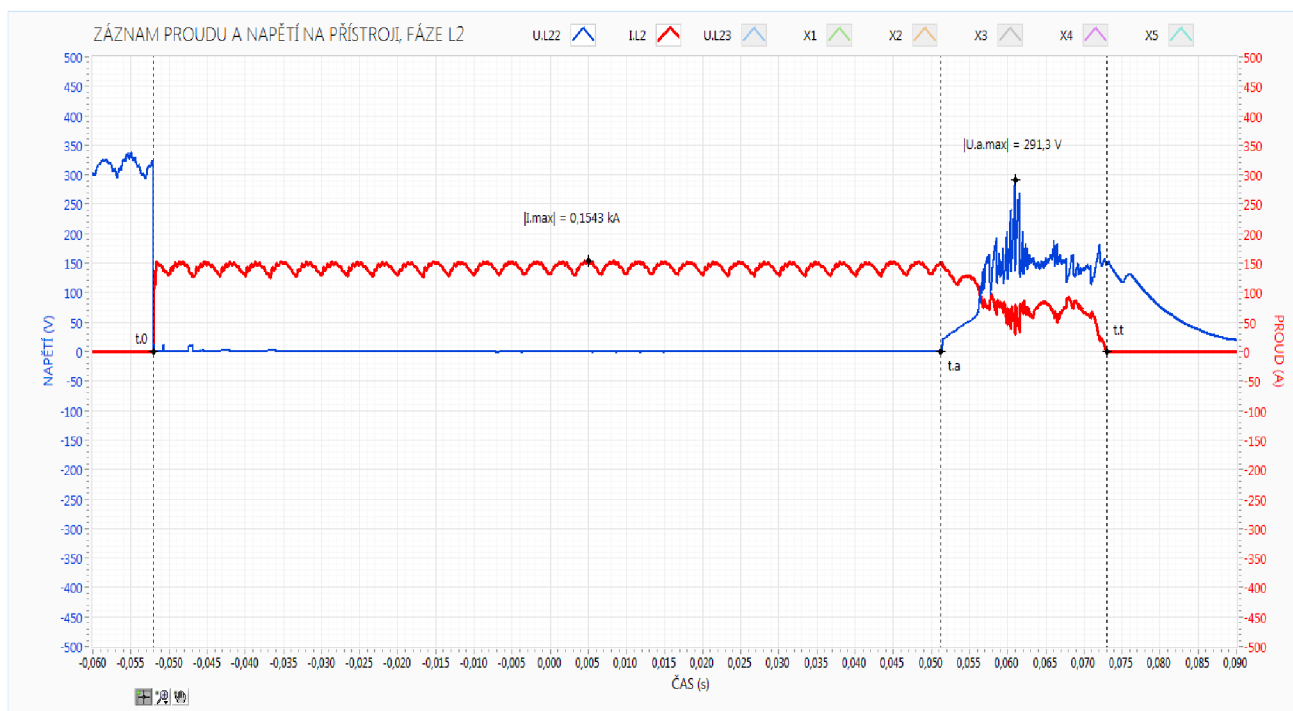
Označení	Test provedl	Vyhodnotil	Datum a čas měření	Reference of voltage and current calibration
PLA_16mm_mag_rever se_polarity-T	Dostal, Lukas	Simek, David	12:03:2018 13:11	

Napětí	Proud	Tau	Typ testu	Trigger	Zdroj	System
314 V	144 A	0	O	STATIC	GS1	DC-23

Teplota okolí	Vlhkost	Rosný bod	Tlak
18,7 °C	43,1 %	5,9 °C	962,3 hPa

Vyhodnocené veličiny:

	$I^2.t$ [k(A ² s)]	$I^2.t.a$ [k(A ² s)]	$I^2.t.p$ [k(A ² s)]	I.max [kA]	U.a.max [V]	Wa [kJ]	t.t [ms]	t.a [ms]	t.p [ms]
L2	2,28	0,16	2,11	0,15	291,25	0,19	125,06	21,74	103,32



4A) Test č.27 - zhašení oblouku (zhašecí komora s úpravou)

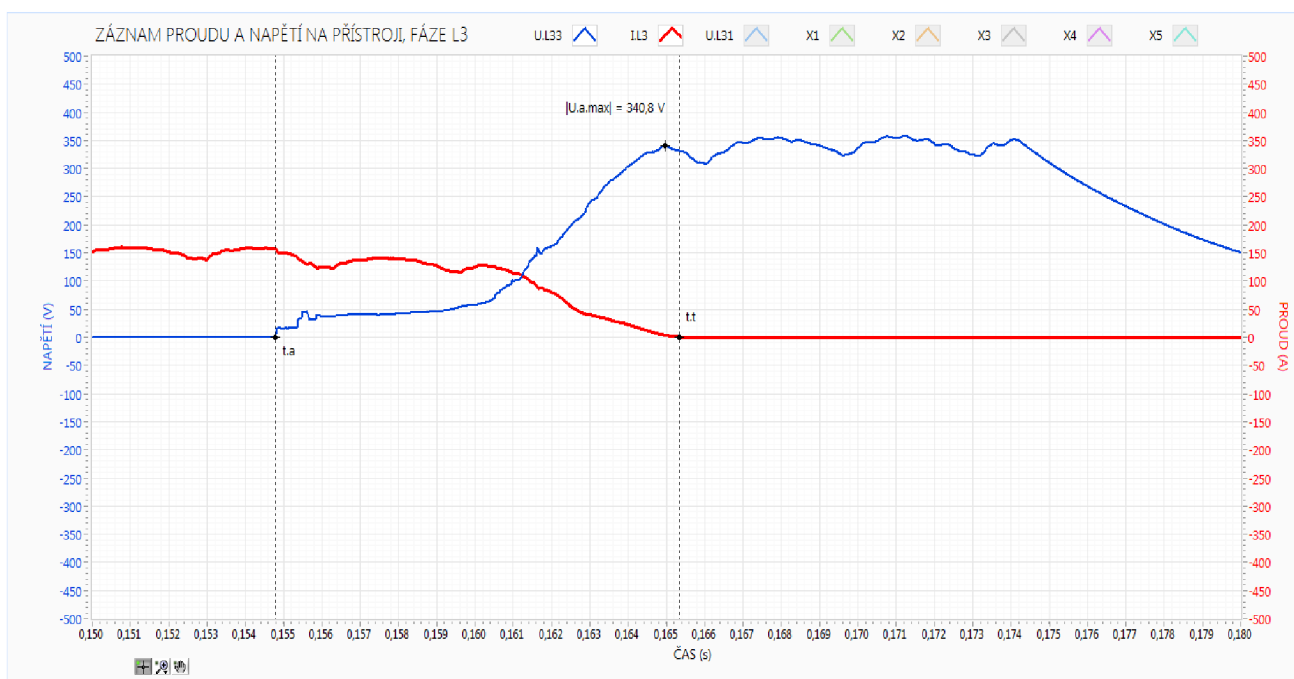
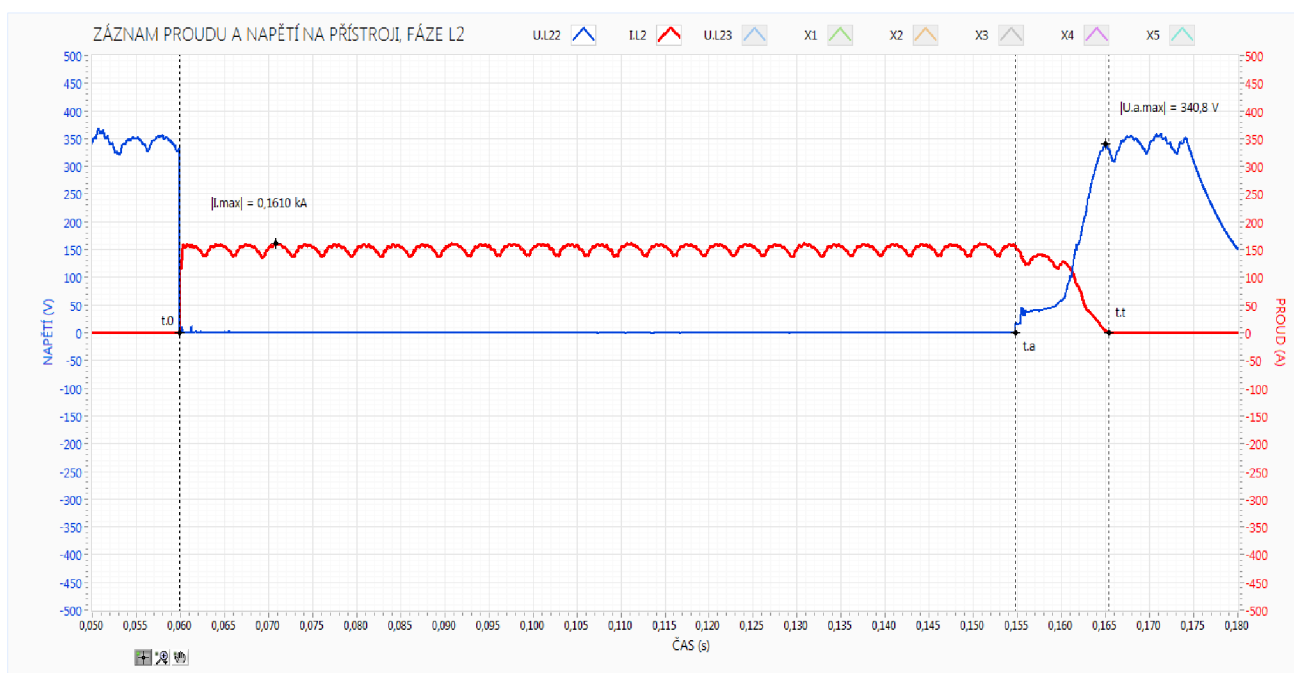
Označení	Test provedl	Vyhodnotil	Datum a čas měření	Reference of voltage and current calibration
PLA_16mm_mag_rever se_polarity_new_arc_ru n-T	Dostal, Lukas	Simek, David	12:03:2018 15:17	

Napětí	Proud	Tau	Typ testu	Trigger	Zdroj	Systém
340 V	150 A	0	O	STATIC	GS1	DC-23

Teplota okolí	Vlhkost	Rosný bod	Tlak
19,6 °C	40,8 %	5,9 °C	963 hPa

Vyhodnocené veličiny:

	$I^2.t$ [k(A ² s)]	$I^2.t.a$ [k(A ² s)]	$I^2.t.p$ [k(A ² s)]	$I.max$ [kA]	$U.a.max$ [V]	Wa [kJ]	$t.t$ [ms]	$t.a$ [ms]	$t.p$ [ms]
L2	2,31	0,12	2,18	0,16	340,81	0,07	105,46	10,56	94,9



5A) Test č.28 - zhašení oblouku s maximální hodnotou proudu a napětí (zhašecí komora s úpravou)

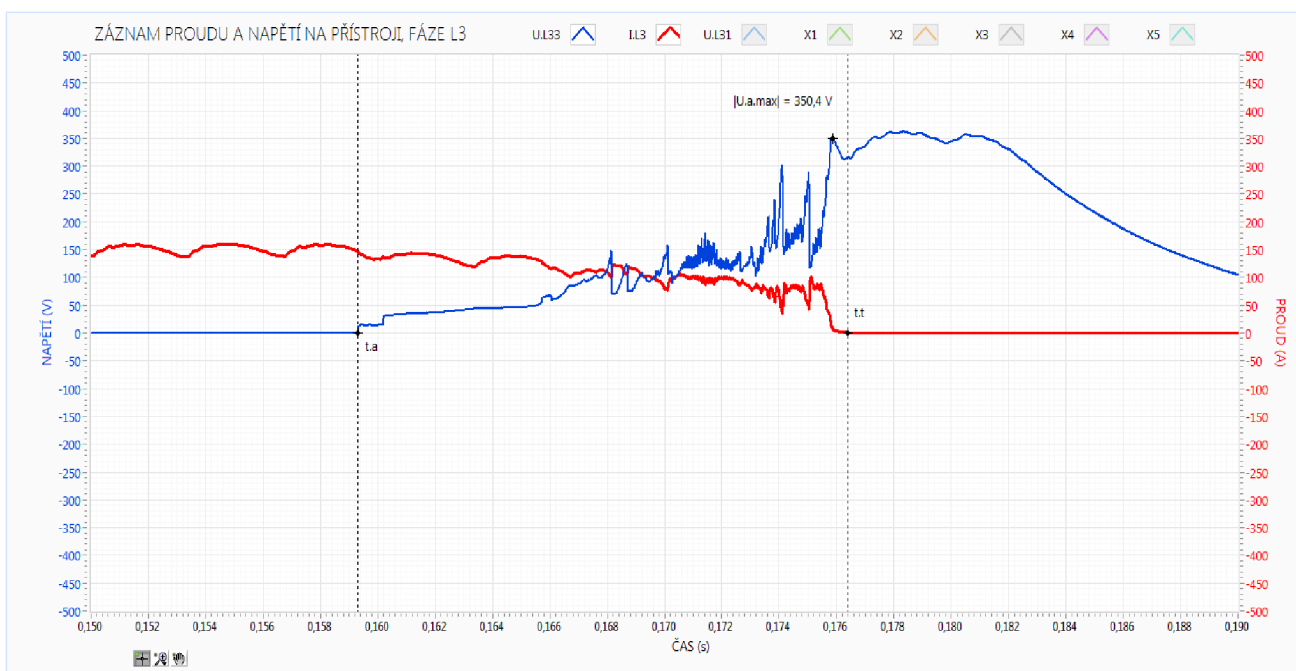
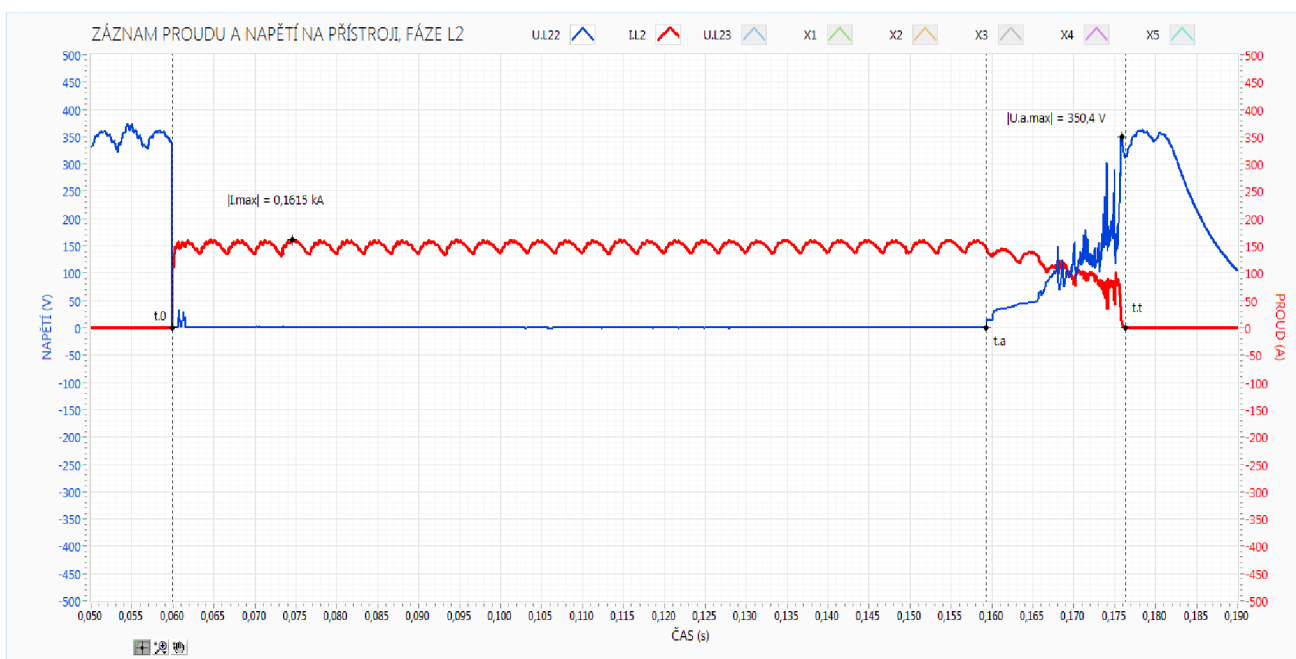
Označení	Test provedl	Vyhodnotil	Datum a čas měření	Reference of voltage and current calibration
PLA_16mm_mag_rever se_polarity_new_arc_ru n-T	Dostal, Lukas	Simek, David	12:03:2018 15:21	

Napětí	Proud	Tau	Typ testu	Trigger	Zdroj	Systém
350 V	150 A	0	O	STATIC	GS1	DC-23

Teplota okolí	Vlhkost	Rosný bod	Tlak
19,4 °C	41,1 %	5,9 °C	963 hPa

Vyhodnocené veličiny:

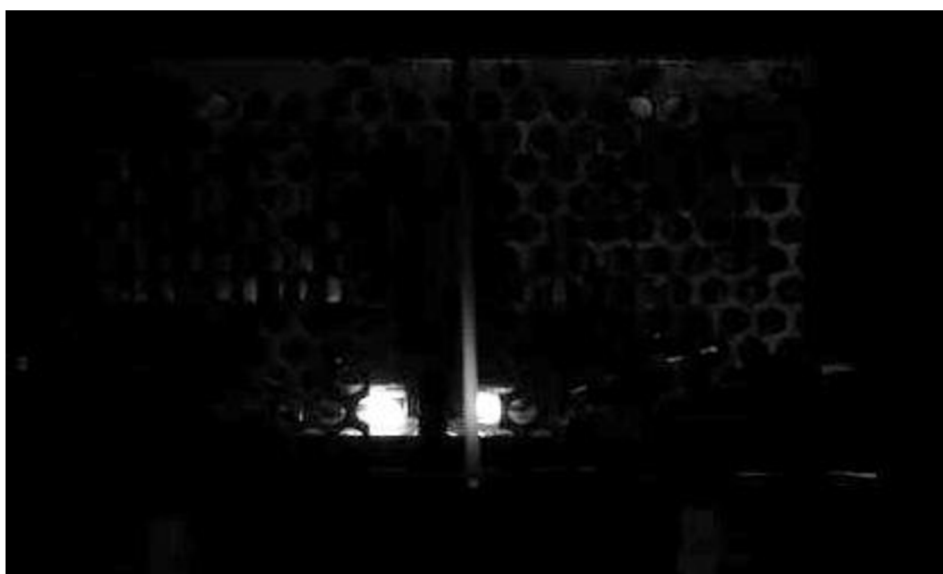
	$I^2 \cdot t$ [k(A ² s)]	$I^2 \cdot t.a$ [k(A ² 2s)]	$I^2 \cdot t.p$ [k(A ² 2s)]	I.max [kA]	U.a.max [V]	Wa [kJ]	t.t [ms]	t.a [ms]	t.p [ms]
L2	2,47	0,21	2,26	0,16	350,44	0,15	116,46	17,02	99,44



1B) Test č.10 - zhašení oblouku (špatná polarita magnetického pole)



Obr. Vznik oblouků při rozeptnutí kontaktů



Obr. Oblouky jsou odpuzovány od magn. pólových nástavců směrem k sobě



Obr. Oblouky jsou magn. polem odpuzeny ze styčných plošek kontaktu (oblouky zanikají)

2B) Test č.18 - zhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)



Obr. Vznik oblouků mezi kontakty



Obr. Magnetické pole urychluje pohyb oblouků k žebrům komory

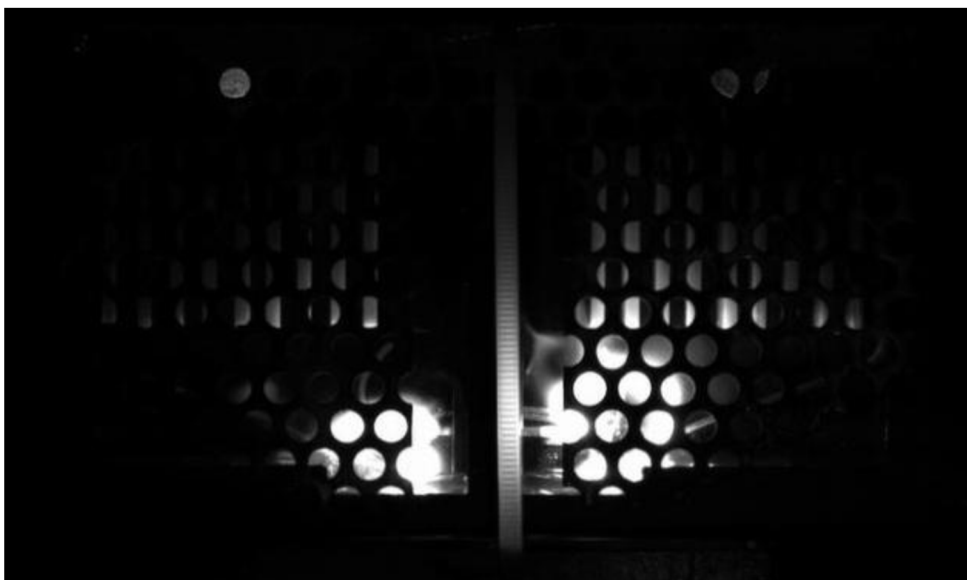


Obr. Oblouk napravo se dostal z kontaktů a zdržuje se na počáteční hranici žeber komory (oblouky zanikají)

3B) Test č.19 - nezhašení oblouku (zhášecí komora bez úprav)



Obr. Vznik oblouků mezi kontakty při rozepnutí



Obr. Znovu zapálení oblouků mezi kontakty



Obr. Oblouky nepřechází na "arc-runners" a zůstávají mezi kontakty (oblouky nezhasínají)

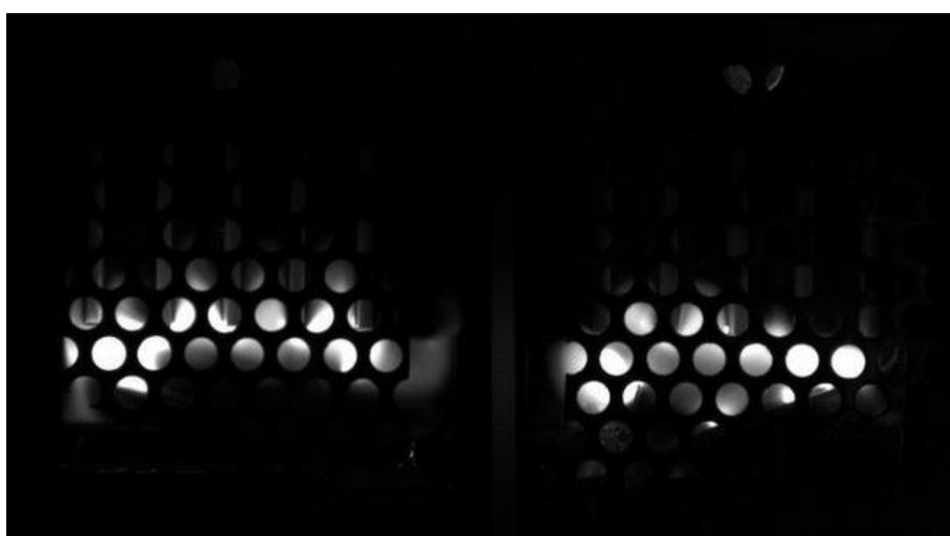
4B) Test č.27 - zhašení oblouku (zhášecí komora s úpravou)



Obr. Pohyb oblouků po "arc-runnerech"



Obr. Oblouky se odtrhly od kontaktů a přechází mezi žebra komory



Obr. Oblouky zanikají mezi žebry zhášecí komory

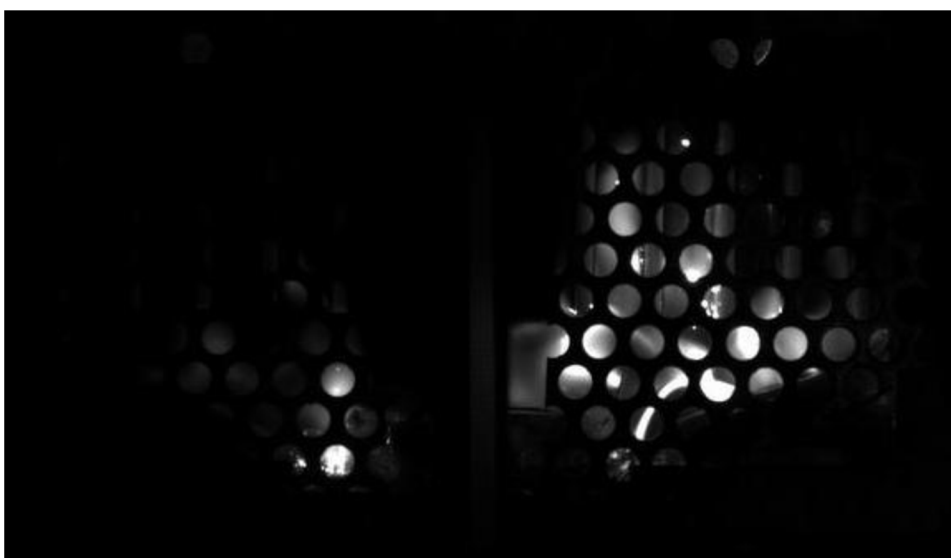
5B) Test č.28 - zhašení oblouku s maximální hodnotou proudu a napětí (komora s úpravou)



Obr. Oblouky se protahují o žebra zhašecí komory



Obr. Znovu zapálení, oblouk vyplňuje převážnou část prostoru mezi žebry



Obr. Uhasnutí oblouku, odpařující se materiály kontaktů