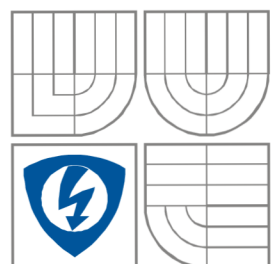


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

**IDEOVÝ NÁVRH ZKUŠEBNÍHO MODELU PRO
STUDIUM VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU NN**

IDEA DESIGN OF EXPERIMENTAL MODEL FOR LV ELECTRIC ARC PROPERTIES INVESTIGATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

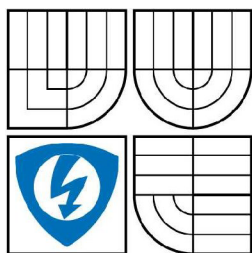
Tibor Fazekas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Ing. Zdeněk Vávra, CSc.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a
komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Tibor Fazekas

ID: 98423

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Ideový návrh zkušebního modelu pro studium vlastností elektrického oblouku nn

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte rešerši dostupných podkladů o experimentálním výzkumu elektrického oblouku nn
2. Vytvořte konstrukční návrh uspořádání modelu včetně základní výkresové dokumentace

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 1. 10. 2008

Termín odevzdání: 29. 5. 2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Vávra, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Práce je zaměřena na návrh experimentálního modelu pro studium vlastností elektrického oblouku nízkého napětí.

V úvodní části jsou rozebrány teoretické podklady o spínání elektrických obvodů a elektrickém oblouku. Následuje stručný popis chování elektrického oblouku ve spínačích nn zaměřený na pohyb oblouku po elektrodách a ve zhašecí komoře. Vlastní návrh experimentálního modelu v prostředí Autodesk Inventor 2008 je stručně popsán v poslední části práce.

Abstract

The aim of the work was a planing of an experimental model for the observation of the low voltage electric arc.

The opening part observes the basics of the electric network switching and the electric arc in theory. The next point is definition about the behaviour of the electric arc in the low voltage switching devices, focusing on the movement of the arc along electrodes and in the extinguish chamber. The design of the experimental model, created in Autodesk Inventor 2008, is described in the last part of the work

Klíčová slova

Elektrický oblouk, zhášení oblouku, nn přístroj, studium vlastností, experimentální model, Autodesk Inventor

Keywords

Electric arc, arc extinction, LV switching device, study of behaviour, experimental model, Autodesk Inventor

Bibliografická citace

FAZEKAS, T. *Ideový návrh zkušebního modelu pro studium vlastností elektrického oblouku m.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Zdeněk Vávra, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma *Ideový návrh zkušebního modelu pro studium vlastností elektrického oblouku* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí semestrální práce doc. Ing. Zdeňku Vávrovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

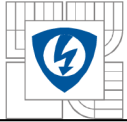
V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

1 ÚVOD	8
2 TEORIE ELEKTRICKÝCH PŘÍSTROJŮ	9
2.1 TEORETICKÉ ZÁKLADY SPÍNÁNÍ	9
2.1.1 PŘECHODNÉ JEVY PŘI SPÍNÁNÍ ELEKTRICKÝCH OBVODŮ	9
2.1.2 PŘECHODOVÉ JEVY PŘI ZAPÍNÁNÍ.....	10
2.1.3 PŘECHODOVÉ JEVY PŘI VYPÍNÁNÍ.....	12
3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU A JEHO ZHÁŠENÍ V OBVODECH STEJNOSMĚRNÉHO A STŘÍDAVÉHO PROUDU	13
3.1 PODSTATA A DRUHY VÝBOJŮ	13
3.1.1 VZNIK VÝBOJŮ	14
3.2 ELEKTRICKÝ OBLOUK A JEHO VLASTNOSTI	16
3.2.1 VZNIK OBLOUKU V PŘÍSTROJÍCH	17
3.2.2 STATICKÁ A DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA OBLOUKU	19
3.3 VYPÍNÁNÍ ELEKTRICKÉHO OBVODU S OBLOUKEM	22
3.3.1 VLASTNOSTI VYPÍNAČÍHO OBLOUKU.....	22
3.3.2 ZÁNİK ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	23
3.3.3 PRINCIPY DEIONIZACE VÝBOJOVÉ DRÁHY V PŘÍSTROJÍCH	23
3.4 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ZHÁŠENÍ STEJNOSMĚRNÉHO OBLOUKU	24
3.5 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ZHÁŠENÍ STŘÍDAVÉHO OBLOUKU	26
3.5.1 PODMÍNKY PRO UHASNUTÍ OBLOUKU	27
4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU	29
4.1 POHYB OBLOUKU PO ELEKTRODÁCH A VE ZHÁŠECÍ KOMOŘE	29
5 IDEOVÝ NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU	32
5.1 TVORBA MODELU ZHÁŠECÍ KOMORY	32
6 ZÁVĚR	36
7 LITERATURA	37
8 SEZNAM OBRÁZKŮ	38
9 SEZNAM TABULEK	39
10 PŘÍLOHY	40



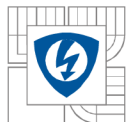
1 ÚVOD

Hlavním požadavkem při vypínacím pochodu elektrického přístroje je dokonalé uhašení elektrického oblouku. Uvedením mechanismu jističe do pohybu dochází nejprve k oddálení kontaktů. Poté se zapaluje elektrický oblouk, který je charakterizován svou vysokou teplotou. Z toho důvodů, že v současnosti používaných konstrukčních materiálů žádný není schopen dlouhodobě odolat této teplotě, nejdůležitější je co nejrychleji přesunout oblouk z prostoru kontaktních stykových ploch do zhašecí komory, kde dochází k jeho zhašení, likvidaci. Tok proudu je přerušen jenom v okamžiku, kdy oblouk je uhašen. Po vypínacím pochodu probíhá obnovení elektrické pevnosti, a pokud bude její hodnota v každém okamžiku větší než velikost zotaveného napětí mezi kontakty, dojde k úspěšnému vypnutí.

Řešení této problematiky není až tak jednoduchá. Nízkonapěťové spínací přístroje se používají k zapnutí a vypnutí elektrického proudu, pro ochranu osob, jakož i elektrických zařízení v elektrizační soustavě. Když se objeví nějaký poruchový proud v soustavě, jejich spínací proces ve většině případů se může dělit do čtyř fází. První, kontakty spínacího přístroje jsou odděleny a mezi nimi je usazený elektrický oblouk. Za druhé, oblouk je protáhlý a přemísťuje se z kontaktního regionu na elektrody, resp. na anodu a katodu. Poté se vlivem Lorentzové a aerodynamické síly posouvá po elektrodových běžcích do zhašecí oblasti. Nakonec se elektrický oblouk rozdělí pomocí kovových destiček, a uhasne. Během těchto procesů se odehrává mnoho fyzických mechanismů, jakým je konvekce a kondukce plynů, záření, magnetické síly, rychlost otevírání kontaktů. Tyto fakty dělají obloukové jevy značně složitými.

Tento výzkum o chování elektrického oblouku má velký význam v rozvoji spínacích zařízení nízkého napětí. Předpovídání chování elektrického oblouku může být užitečná pro projektanty ke zlepšení výkonnosti zařízení.

Hlavním důvodem, proč je řešen tento projekt, je potřeba porozumění chování elektrického oblouku a tvorba teoretického zkušebního modelu, který nám umožní další zkoumání. Elektrický oblouk je řešen ve zhašecí komoře NN jističe. Konstrukční návrh modelu je vytvořen pomocí 3D modelovacího softwaru Autodesk Inventor 2008.



2 TEORIE ELEKTRICKÝCH PŘÍSTROJŮ

2.1 Teoretické základy spínání

Teoretické základy dávají možnost pro konstrukci elektrických přístrojů vzhledem k jejich funkci, dimenzování jejich funkčních částí z hlediska možných účinků napětí a proudů v normálním provozním stavu, a v stavu přechodném.

Každý elektrický obvod má tzv. základní funkční stavy. To jsou zapnutý stav a vypnutý stav. V případě zapnutého obvodu, na všechny části a zařízení obvodu působí tepelné a silové účinky proudu a na tyto účinky musí být celý obvod dimenzován. Kromě toho musí zařízení v obou funkčních stavech vyhovovat z hlediska působení napětí, tj. musí splňovat podmínku izolační pevnosti mezi fázemi a vzhledem k zemnímu potenciálu.

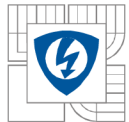
Přechod mezi funkčními stavy, tj. z jednoho stavu do druhého, zajišťuje spínací přístroj. Základní úkony jednoduchého spínacího přístroje jsou zapínání a vypínání, a jsou to přechodné dynamické jevy obvodu. V přechodných stavech obvodu nabývá původně statické namáhání charakter rázového namáhání, které se zvětšuje s možným výskytem nadproudů a přepětí v havarijních stavech obvodu. Spínací přístroje vzhledem k VN jsou tyto dynamické stavy spojené se vznikem elektrického oblouku. Účinky elektrického oblouku zvětšují namáhání přístroje a současně ovlivňují také poměry v obvodu. Vznik zkratového proudu a jeho vypínání je pro obvod a spínací přístroj nejobtížnějším.

2.1.1 Přechodné jevy při spínání elektrických obvodů

V elektrickém obvodu vzniká přechodný jev při náhlé změně napětí zdroje, popř. při změnách jiných parametrů (frekvence, fáze, amplitudy apod.).

Nejčastěji vzniká přechodný jev při zapnutí nebo vypnutí obvodu, což je spojeno s dodávkou nebo přerušením dodávky elektrické energie. Vzniká v obvodech, které obsahují prvky schopné hromadit (akumulovat) energii a potom ji odevzdat zpět do zdroje. Takovými prvky jsou cívka a kondenzátor.

Cívka spotřebuje elektrickou energii pro vytvoření magnetického pole. Při zániku magnetického pole se energie vrací do obvodu ve formě indukovaného napětí. Vlastnost prvku elektrického obvodu indukovat napětí, popř. proudy, nazýváme indukčnost. Kondenzátor spotřebuje elektrickou energii pro vytvoření elektrického pole. Energie zůstane nahromaděná v polarizovaném dielektriku ve formě energie elektrického pole. Při zániku elektrického pole se energie vrací do obvodu ve formě vybíjecích proudů kondenzátoru. Vlastnost prvku elektrického obvodu udržet náboj při určitém napětí nazýváme kapacita. Přechodný jev v elektrickém obvodu je krátkodobý děj, který však nemůže trvat libovolnou krátkou dobu. Po připojení obvodu ke zdroji napětí nedosáhne proud okamžitě konečné hodnoty, protože s jeho vznikem je spojena existence magnetického pole, popř. elektrického pole, které mají určitou energii. Při konečném výkonu zdroje je proto potřebné určit dob pro vytvoření magnetického, popř. elektrostatického pole. Po odpojení zdroje od obvodu nemůže vytvořené



magnetické, popř. elektrické pole okamžitě zaniknout. Opět je k tomuto zániku potřebná určitá doba. Proud proto klesá tak, jak klesá energie, která se postupně mění na Joulovo teplo. Přechodné jevy lze velmi snadno pozorovat katodovým osciloskopem. Napětí na vstup osciloskopu, který je úměrný proudu v obvodu, se odebírá na svorkách rezistoru[1].

Matematické vyjádřené změny proudu, napětí, popř. dalších veličin obvodu v přechodném stavu, v závislosti na čase je řešením přechodného jevu. V obvodech střídavého proudu je řešení přechodného jevu velmi složitá a matematické řešení se neobejde bez znalostí vyšší matematiky. V obvodech stejnosměrného proudu mají přechodné jevy jednodušší průběh[1].

Pojem spínání je pojem obecný a zahrnuje v sobě zapínání, přepínání a vypínání v jakémkoliv stavu obvodu. Časem se požadavky na spínací přístroje narůstali, požadavky jako výkonnost zařízení, ekonomičnost stavby a provozu. A kvůli těmto požadavkům bylo nutné nejdříve pozorovat, pak analyzovat tyto nastávající jevy při přechodu obvodu z jednoho stavu do druhého[1].

Aby bylo možné přechodné jevy analyzovat, je potřeba nahradit skutečný obvod a přistoupit k idealizaci. V náhradním schématu jsou lineární obvody se soustředěnými parametry. Výsledný přechodný děj bude odpovídat se skutečností tak, jak náhradní, idealizovaný obvod skutečnému obvodu[1].

Nejjednodušší schéma ve kterém vypínač pracuje, a kterým se dá obvod nahradit je znázorněn na Obr. 1. Při zapínání bude kondenzátor spojen nakrátko a není jej třeba uvažovat. Přechodný děj bude dán pouze energií induktoru a bude charakterizovat nárůst proudu v obvodu. Při vypínání bude charakterizovat nárůst napětí na svorkách vypínače[1].

Rozdíl mezi počátečním a konečným energetickým stavem obvodu je příčinou přechodného jevu, a fyzikální podstata je dána vlastnostmi členů, ze kterých je náhradní obvod složen. Velký vliv na průběh přechodného jevu má původní stav obvodu, daný počátečními podmínkami, a nejen struktura obvodu a charakter výstupní veličiny[1].

2.1.2 Přechodové jevy při zapínání

Při zapínání obvodu podle obr. 1 bude po dosažení kovového styku kontaktů kondenzátor zkratován a obvod lze popsat rovnicí 2. Kirchofova zákona

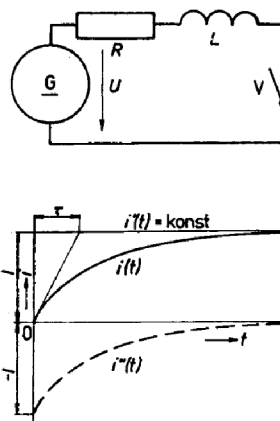
$$U = R \cdot i + L \frac{di}{dt}$$

jejímž řešením je průběh proudu obvodem, který závisí na charakteru zdroje. Řešení této nehomogenní lineární diferenciální rovnice je možné za použití některé z vhodných metod. V případě, že obvod je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí bude za počáteční podmínky $t=0$, $i=0$ výsledný proud

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

kde $\tau = L/R$ [s] je časová konstanta obvodu.

Výsledný proud je dán součtem ustálené složky a přechodné složky, která se s časem zmenšuje k nule. Tato přechodná složka proudu vyrovnává rozdíl mezi počátečním a konečným ustáleným stavem. Strmost nárůstu proudu je tím menší, čím větší je časová konstanta obvodu, tj. čím větší je poměr indukčnosti k odporu obvodu[1].



Obr. 1 Zapínání v stejnosměrném obvodu

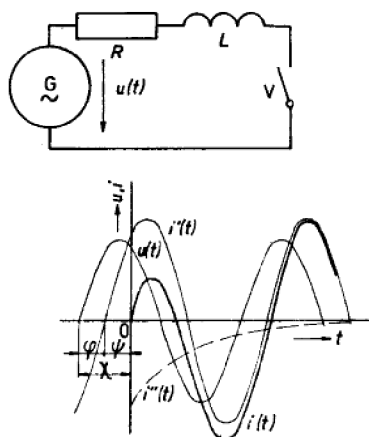
Jestliže obvod RL připojíme ke zdroji střídavého napětí $u = U_m \sin(\omega t + \chi)$, tj. napětí s amplitudou U_m , úhlovou frekvencí $\omega = 2\pi f$ a fází χ po nulové hodnotě proudu, je nárůst proudu po zapnutí spínače V dán řešením diferenciální rovnice

$$L \frac{di}{dt} + R \cdot i = U_m (\sin \omega t + \chi)$$

Výsledný proud (Obr. 2.) je opět dán součtem ustálené složky $i' = I_m (\sin \omega t + \chi - \varphi)$ zpožděné za napětím o úhel φ a přechodné složky $I_m \sin(\chi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$, jejíž časový průběh opět souvisí s velikostí časové konstanty obvodu a jejíž počáteční velikost je závislá na okamžiku zapnutí vzhledem k průběhu ustálené složky. Pokud je úhel $\chi = \pm k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), dochází k zapnutí v nulové hodnotě ustálené složky proudu a přechodný děj nenastane. Jestliže je $\chi = \pm k\pi/2$ ($k = 1, 3, 5, \dots$), tzn., že ustálená složky proudu prochází svou maximální hodnotou, dochází k nejnepříznivějšímu zkreslení výsledného proudu. Počáteční proud je asymetrický a jeho maximální velikost je přibližně dvojnásobek amplitudy ustáleného proudu. Z hlediska možných případů zapnutí jsou tyto dva případy mezní[2].

Přitom je nutné připomenout, že

$$I_m = \frac{U_m}{Z}, \text{ kde } Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{R}{\cos \varphi}$$



Obr. 2 Zapínání ve střídavém obvodu

S okamžikem zapnutí obvodu se ztotožňuje začátek tepelných a silových účinků proudu.

2.1.3 Přechodové jevy při vypínání

U přechodových jevů při vypínání (Obr. 3.) je nutné ve schématu uvažovat také kapacitu vedení, která byla při zapínání spojena nakrátko. Obvod při vypínání se tak změní na obecný kmitavý obvod tvořený rezistorem, induktorem a kondenzátorem.

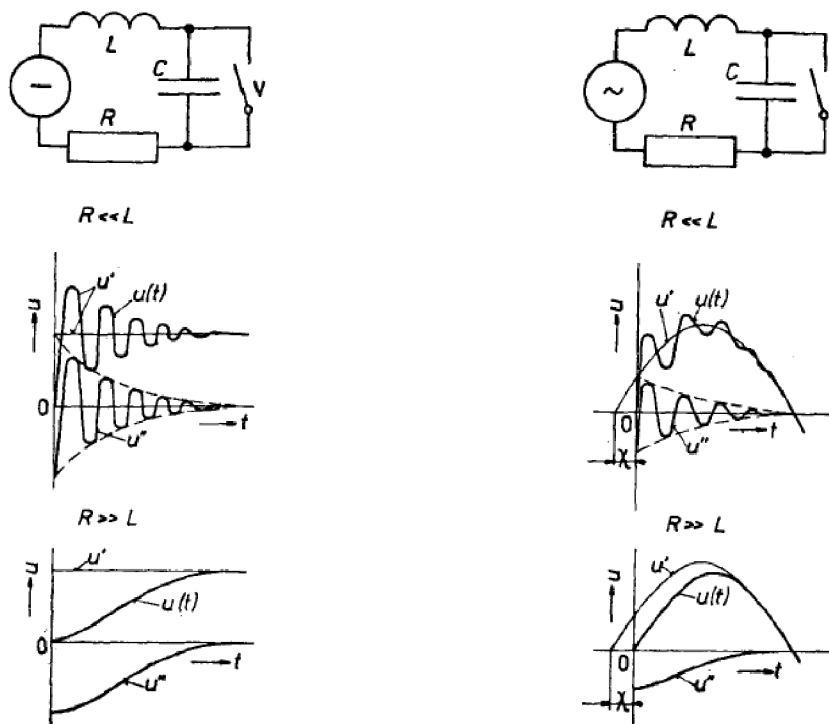
$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = u(t)$$

Protože pro nabíjení kondenzátoru platí

$$u(c) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad \rightarrow \quad i = C \frac{du_c}{dt}$$

lze předcházející rovnici přepsat do tvaru

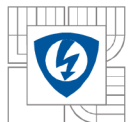
$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u(t)$$



Obr. 3 Vypínání v stejnosměrném a ve střídavém obvodě

Při vypínání reálným vypínačem mohou nastat jiné podmínky, které pak ovlivní řešení a které plynou z následujících skutečností[1].

- Při vypínání vzniká elektrický oblouk, charakterizovaný určitým napětím na oblouku.
- Při vypínání může dojít k přerušení proudu před přirozenou nulou (useknutí proudu).
- Po vypnutí zůstane mezikontaktní prostor po určitý čas v ionizovaném stavu, což se projeví jeho zbytkovou vodivostí, která se mění časem.



3 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ELEKTRICKÉHO OBLOUKU A JEHO ZHÁŠENÍ V OBVODECH STEJNOSMĚRNÉHO A STŘÍDAVÉHO PROUDU

Přerušuje-li se pomocí kontaktů elektrických přístrojů (vypínačů, jističů, stykačů, atd.) obvod, kterým prochází proud, dochází mezi kontakty ke vzniku oblouku, jestliže napětí a proud v obvodu přestoupili jistou velikost. Velikost tohoto napětí a proudu závisí na řadě činitelů: materiálu, z něhož jsou vyrobeny kontakty, na parametrech elektrického obvodu, prostředí, v němž kontakty pracují atd. Uveďme příklad: mezi měděnými kontakty vzniká při přerušování stejnosměrného proudu elektrický oblouk již při proudech kolem 0,5A a napětí 15V. Dosahuje-li proud a napětí nižších hodnot, kontakty při rozpojování pouze jiskří[3].

Elektrický oblouk způsobuje značné opotřebení kontaktů a vede ke snížení životnosti přístroje; stupeň opotřebení je určen vypínaným proudem a dobou, po níž hoří mezi kontakty oblouk. Proto představuje zkrácení dob hoření oblouku (tedy zintenzívnění hasicího pochodu) jeden z nejučinnějších zásahů, chceme-li zmenšit opotřebení kontaktů elektrických přístrojů[3].

Na druhé straně však působí elektrický oblouk v určitém směru příznivě. Například při vypínání stejnosměrného proudu přechází značná část elektromagnetické energie vázané na vypínaný obvod do oblouku a v podobě tepelné energie se odvádí do okolního prostředí; tím se snižuje přepětí, které vzniká v obvodu[3].

Při přerušování obvodu střídavého proudu hoří oblouk zpravidla celou půlperiodu (přibližně až do okamžiku, kdy proud prochází nulou) a elektromagnetická energie obvodu je minimální. Vlivem toho se zmenšuje značně pravděpodobnost vzniku velkého přepětí[3].

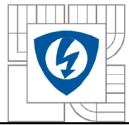
U vypínačů pracujících v obvodech, v nichž procházejí značné proudy a působí vysoká napětí, se ke zkrácení doby hoření oblouku používají speciální zařízení k jeho zhášení (zhášecí komory nebo zhášedla). Se zvětšováním požadovaných hodnot vypínaného proudu a napětí se příslušná zařízení stávají značně složitá. Přidavná zhášecí zařízení jsou zcela nezbytná, protože bez nich nelze zajistit zánik oblouku a tím rozpojení oblouku[3].

Děje, jež probíhají při hoření oblouku mezi kontakty, jsou komplikované. Závisí na mnohých činitelích a v současné době nejsou ještě zcela objasněny. Dosažené poznatky však rozhodně umožňují navrhnout a zkonstruovat přístroje vysokého a nízkého napětí i určit hranice jejich vypínacích schopností[3].

3.1 Podstata a druhy výbojů

Elektrický výboj je fyzikální jev, v němž se izolant vlivem tepelných pochodů, které v něm probíhají, stává vodičem elektrického proudu. Ve většině případů jde o krátkodobý jev, který zprostředkuje přechod prostředí z nevodivého stavu do vodivého. Celý pochod je poměrně složitý a je výsledkem mnoha dílčích dějů[4].

Pro umožnění průchodu proudu libovolným prostředím musíme do tohoto prostředí přivést nebo v něm vytvořit elektricky nabyté částice. V kovových vodičích to jsou volné elektrony, jež uvolňuje a uvádí do pohybu zdroj. Tento druh vodiče tvoří ve výbojích elektrody, v jejichž bezprostředním okolí se elektronová vodivost mění v iontovou vodivost ve sloupci výboje.



Přesto, že se vodivost ve sloupci výboje nazývá iontová, je vedení proudu zprostředkováno převážně elektrony[4].

Průchod proudu plynným dielektrikem je tedy možné pouze v případě, kdy mezi elektrodami se nacházejí nabitě částice, tj. elektrony a ionty. Pro vznik výboje je nutné, aby na elektrodách bylo napětí. Podle velikosti proudu a částečně i podle napětí na elektrodách se rozeznávají několik druhů elektrických výbojů. Jsou to: temný výboj, korónový výboj, doutnavý výboj, jiskrový výboj a obloukový výboj[4].

Obloukový výboj je samostatný výboj mezi elektrodami, charakteristický vysokými proudy a teplotami (tisíce kelvinů). Probíhá nejčastěji za atmosférického tlaku a používá se při obloukovém sváření kovů, na tavení apod.[4].

Jiskrový výboj je krátkodobý samostatný výboj, který vzniká při vysokém napětí mezi dvěma vodiči za atmosférického tlaku a je doprovázen zvukovými a světelnými efekty. Jiskra má podobu jasně svítících rozvětvlujících se kanálků, ve kterých dochází k ionizaci při teplotě až 30 000 K. Nejznámějším jiskrovým výbojem je blesk, kterým se vyrovnává napětí (miliony voltů) mezi dvěma mraky nebo mezi mrakem a zemí[4].

Koróna je samostatný trsovitý výboj, který vzniká v silně nehomogenním elektrickém poli okolo drátů, hran a hrotů s vysokým potenciálem. Vzniká také za atmosférického tlaku. Způsobuje ztráty na vedení vysokého napětí, ruší rozhlas a televizi[4].

Doutnavý výboj je samostatný výboj s viditelnou složkou, který lze pozorovat ve výbojkách (výbojových trubiciích) za snížených tlaků. Probíhá při malých proudcích (řádově miliampéry), teplota výbojky i elektrod je nízká. Doutnavý výboj (v xenonových, sodíkových, rtuťových výbojkách, v zářivkách) je úsporným zdrojem světla. Světlo výbojek je při daném příkonu asi 5krát intenzivnější než světlo klasických žárovek. Ve rtuťových parách v křemenných trubiciích je doutnavý výboj zdrojem UV záření[4].

Formálně je každý výboj určen elektrodami a prostorem mezi nimi. Tento prostor je pro výboj určující a vytváří se v něm sloupec výboje, vyplněný plazmatem výboje.

Parametry určující vlastnosti elektrických výbojů jsou: napětí na elektrodách, proud procházející výbojovou dráhou, chemické složení plazmatu výboje, tlak ve výbojové dráze, tvar a materiál elektrod. Tyto parametry jsou vzájemně závislé, změna jednoho parametru má za následek změnu ostatních. Např. napětí na elektrodách závisí na proudu procházejícím výbojovou dráhou, velikost proudu závisí na chemickém složení tlaku prostředí atd.[4].

Jednotlivé parametry určují další vlastnosti výbojů: Průměr výbojové dráhy, vlastnosti anodového a katodového prostoru, průběh napětí podél osy plazmatu a teplotu elektronů, iontů a popř. molekul tvořících plazma.

Závislost napětí mezi elektrodami na proudu procházejícím obloukem nazýváme charakteristikou výboje.

3.1.1 Vznik výbojů

Pro vznik výboje v plynném dielektriku je nutné přivést do plynu elektricky nabitě částice, nebo je v něm vytvořit.

Temný výboj je prvním výbojovým jevem uvedeným v přehledové charakteristice. Tento druh se nazývá nesamostatným, protože pro svoji existenci potřebuje vnější zdroj nabitých částic,



popř. zdroj energie schopný v něm tvořit ionty. Proud procházející prostorem, ve kterém existuje temný výboj, je řádově 10^{-8} A, k jeho udržení stačí elektrony vystupující z katody a v menší míře volné elektrony v prostoru mezi elektrodami[4].

Temný výboj je v elektrických zařízeních poměrně řídkým jevem a jeho případný výskyt není pro provoz elektrických zařízení nebezpečný, pokud je provozní napětí nižší než průrazné napětí uvažovaného plynového dielektrika. Vzrůstá-li provozní napětí a blíží-li se následkem toho intenzita elektrického pole elektrické pevnosti prostředí, přechází temný výboj v korónu[4].

Pochopení vzniku koróny umožní rozbor dějů probíhajících v prostoru mezi elektrodami. Omezí se na plynné prostředí, ve většině případů to bude vzduch. Plyn je souborem molekul pohybujících se všemi směry. Rychlosti pohybu molekul jsou různé, jedním z možných rozdělení je Maxwellovo rozdělení rychlostí[4].

Toto rozdělení připouští, že v souboru se molekuly pohybují rychlostmi od téměř nulových až po řádově 10^3 m/s. Pohyb molekul je chaotický, molekuly na sebe narážejí. Při pružných srážkách mění jen rychlosti a směry; při nepružných srážkách se kinetická energie srážejících se molekul se molekul mění v jinou, nejčastěji disociační, a molekuly se mohou rozpadat na radikály, popř. atomy. Tento jev se nazývá disociace molekul. Disociaci podporují i elektrony vystupující z katody a urychlované elektrickým polem. Celý pochod má statistický charakter a může při něm nastat i rozpad radikálů na jednotlivé atomy. Radikály i atomy nejsou schopny samostatné existence a spojují se v molekuly. Přesto, že doba částic a v závislosti na energii obou částic může dojít ke srážce pružné nebo nepružné. Při pružné srážce si částice vymění kinetické energie, při nepružné se část jejich energie změní v energii budící nebo ionizační[4].

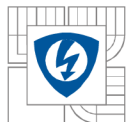
Nepružná srážka může mít dvojitý rozdílný následek: nabuzení nebo ionizaci. Při nabuzení se kinetická energie srážejících částic změní v potenciální energii systému jádro-obal atomu, to znamená, že některý z okrajových elektronů je přemístěn do nestabilní dráhy. Po návratu do stabilní dráhy vyžáří uvolněnou potenciální energii jako foton elektromagnetického záření určité vlnové délky[4].

Při ionizaci se oddělí jeden z obalových elektronů atomového obalu a z neutrálního atomu dostaneme kladný a záporný iont. Oba ionty, pokud se nespojí s jinými v neutrální částici, tj. pokud nerekombinují, jsou urychlovány elektrickým polem. Iont se pro svoji velkou hmotnost pohybuje pomalu, zatímco poměrně lehký elektron rychle proběhne dráhu potřebnou pro získání energie dostačující k nabuzení, popř. k ionizaci. Celý děj se opakuje a pro existenci výboje je nutné, aby ionizační pochody byly v rovnováze s pochody rekombinačními. Ionizační pochody mají za následek vznik plynu schopného vést elektrický proud; říkáme, že plyn přešel do plazmatického stavu a vzniklý útvar nazýváme plazma elektrického výboje[4].

Při vzniku koróny stejně jako při vzniku všech ostatních výbojů převládají ionizační pochody nad rekombinačními; po dobu existence výboje jsou oba pochody v rovnováze a při zániku výboje převládá rekombinace nad ionizací[4].

Koróna jako jediný ze samostatných výbojů nepotřebuje stabilizační rezistor; jeho funkce přejímají okrajové vrstvy koróny, při koróně existují pouze na jedné elektrodě a střední část koróny při korónovém výboji mezi dvěma elektrodami[4].

Na doutnavý výboj navazuje v charakteristice elektrická jiskra a elektrický oblouk. Plazma obou těchto výbojů je v termické rovnováze, oba výboje mohou existovat, jestliže je mezi elektrodami tlak stejný s atmosférickým anebo je větší[4].



Koróna za určitých okolností poměrně snadno může přejít v jiskru nebo elektrický oblouk. Nastane to v případě, kdy intenzita elektrického pole v koróně je téměř stejná s elektrickou pevností plynu, ve kterém koróna hoří. Může se zde vytvořit vodivé spojení mezi oběma elektrodami jako následek vzniku elektronové laviny[4].

Jiskra i oblouk patří mezi samostatné výboje, rozdíl mezi nimi je dán dobou existence. Oblouk může existovat principiálně libovolně dlouhou dobu, zatímco jiskra vždy existuje pouze velmi krátkou dobu. Pokud podmínky v elektrickém obvodu neumožní přechod jiskry v oblouk, zanikne jiskra sama bez zhašecího zařízení, zatímco pro zánik oblouku je nutný mechanický nebo elektromechanický zásah do jeho struktury. Obecně musí v oblasti obloukového výboje při jeho zhašení převládnout rekombinační pochody nad ionizačními. Způsob, jakým toho dosáhneme, je dán konstrukcí zařízení, v němž oblouk zhašíme[4].

3.2 Elektrický oblouk a jeho vlastnosti

Elektrický oblouk je výboj hořící v plynu, schopný samostatné existence libovolnou dobu, pokud se nepřeruší vhodným zásahem do jeho mechanismu.

Hlavní znaky oblouku jsou:

- Vysoká teplota katodové skvrny (nebo katody vůbec) dostačující k tepelné emisi elektronů.
- Hustota proudu katodové skvrny se řádově rovná desítkám MA/m^2 .
- Malé elektrodové úbytky.
- Malé napětí mezi elektrodami (vzhledem k napětí zdroje).
- Velký proud procházející obloukem (větší než 1A).
- Intenzivní vyzařování světla z výbojového plazmatu a z elektrod.

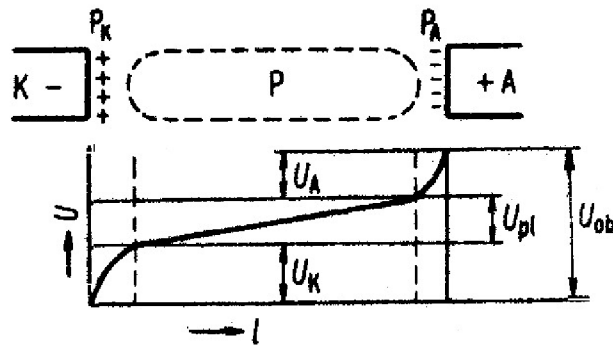
Podle druhu napětí v obvodu, ve kterém oblouk hoří, dělíme oblouky na oblouk napájený stejnosměrným proudem a na oblouk napájený střídavým proudem. Dále se budou používat termíny stejnosměrný a střídavý oblouk. Stejnosměrný oblouk se uvažuje za statický, závislost napětí mezi elektrodami na obloukovém proudu se nazývá v tomto případě statická charakteristika. Střídavý oblouk je proměnný s časem, jeho charakteristika se nazývá dynamická. Přesto, že střídavý oblouk je časově proměnný, může existovat v ustáleném kvazistacionárním stavu, kdy časové změny jeho parametrů sledují časový průběh napájecího proudu[4].

Doba vytváření oblouku je velmi krátká, řádově 10^{-6}s . Po vytvoření je plazma oblouku v termické rovnováze, to znamená, že elektrony, ionty, neutrální atomy a popř. molekuly mají stejné teploty. Oblouk je schopen samostatně existovat, probíhají-li v něm ionizační pochody, které po dobu existence oblouku jsou v rovnováze s rekombinačními pochody[4].

Při zániku oblouku převládají rekombinační pochody nad ionizačními. Této převahy lze dosáhnout různými postupy.

Makroskopicky se oblouk jeví jako svítící ostře ohraničený plynný tvar mezi elektrodami. V prvním přiblížení se může považovat za souměrný, osou souměrnosti však není přímka. Svítící útvar je tvořen plazmatem oblouku. Plazma je vyhřáté na poměrně vysokou teplotu a je dobrým vodičem elektrického proudu[4].

Při změření rozdělení potenciálu v plazmatu oblouku výsledná křivka pro závislost napětí na délce oblouku je znázorněná na obrázku 4.



Obr. 4 Průběh potenciálu v oblouku

A - anoda, K - katoda, U_a - anodový úbytek napětí, U_k - katodový úbytek napětí, U_{pl} - úbytek na sloupci, U_{ob} - napětí na oblouku

V oblastech elektrod roste potenciál velmi rychle; tyto oblasti se nazývají katodový a anodový úbytek. Katodový a anodový úbytek mají různé velikosti, jejich hodnota závisí na materiálu elektrod. Mezi elektrodovými oblastmi je vzrůst potenciálu pomalejší a jeho průběh je lineární. Tato část křivky znázorňuje průběh potenciálu ve sloupci oblouku[4].

Zahrne-li se součet katodového a anodového úbytku do jediné konstanty α , může se průběh potenciálu ve sloupci oblouku popsat vztahem

$$U_a = \alpha + \beta l_a$$

kde α je součet elektrodových úbytků, β je spád napětí oblouku, l_a délka oblouku a U_a je napětí na oblouku. Veličina β je totožná s intenzitou elektrického pole v oblouku a je definována jako gradient potenciálu ve směru osy oblouku[4].

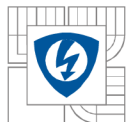
Při průchodu elektrického proudu plazmatem vznikají v plazmatu tepelné ztráty, které se projeví jako zvýšení teploty plazmatu. Za velmi krátkou dobu po vzniku oblouku je jeho plazma vyhřáté na vysokou teplotu. Teplota není v celém průřezu plazmatu stejná. V ose plazmatu je nejvyšší a směrem k okrajům plazmatu se snižuje. Rozdělení teploty v závislosti na poloměru se označuje jako radiální průběh[4].

Okrajová teplota plazmatu v místech, kde plazma nezáří, je 2000K až 4000K. Její velikost je určena ionizační energií atomů plynu, ve kterém oblouk hoří. Jsou-li v plynu atomy s malou ionizační energií, např. atomy sodíku nebo draslíku s $W=5\text{eV}$, je to 2000K; ve vzduchu, kde ionizační energie je $W=14\text{eV}$, je to 4000K. Při těchto teplotách je kinetická energie schopna vyvolat ionizační pochody[4].

3.2.1 Vznik oblouku v přístrojích

Alternativy vzniku

Principiálně pochody při vzniku oblouku ve spínacích přístrojích se dělí do dvou skupin: vytvoření oblouku při spínání a při vypínání. Zapínací oblouk ve většině případů zanikne bez znatelného vlivu na spínací pochod. Vypínací oblouk je nutné přivést k zániku vhodným zásahem do jeho fyzikálního mechanismu. Protože vypínané proudy mohou dosáhnout velkých hodnot, je zhašení tohoto druhu oblouku poměrně obtížné.



Zapínání

Zapínací pochod je charakterizován přibližováním kontaktů spínače, na kterých se potenciální rozdíl rovná napětí zapínaného zdroje. Při přibližování kontaktů se zvětšuje intenzita pole v prostoru mezi kontakty, v určitém okamžiku dosáhne velikosti porovnatelné s elektrickou pevností prostředí, které je mezi kontakty[4].

Při dosažení kritické intenzity elektrického pole je síla způsobující urychlování elektronů tak velká, že kinetická energie urychleného elektronu je schopna vyvolat ionizaci atomu, na který urychlený elektron narazil. Oblouk vzniká přes mezifázi doutnavého výboje na principu nárazové ionizace (vznik elektronové laviny). Zapínací elektrický oblouk, však trvá velmi krátkou dobu, dokud se přibližující elektrody nedotknou. Při vodivém spojení kontaktů oblouk zanikne[4].

Za předpokladu, že volná dráha elektronu ve vzduchu za normálního tlaku je řádově 10-3mm, elektrická pevnost vzduchu je 3kV/mm, vzdálenost elektrod je minimálně 100 volných drah (k vytvoření elektronové laviny), vznikne oblouk při zapínání pouze při napětí na elektrodách vyšších než 300V[4].

Při nižším napětí na elektrodách vznikne při zapínání elektrický oblouk, jestliže po prvním dotyku kontaktu se tyto vlivem pružných sil odrazí a nastane-li kmitavý pohyb jednoho z kontaktů. V tomto případě může vzniknout elektrický oblouk s negativním vlivem na elektrody. Mechanismus vzniku oblouku v tomto případě je stejný jako v případě oddalování kontaktů při vypínání[4].

Při odražení kontaktů vypínače zapínajícího velký proud může mít oblouk za následek trvalé svaření kontaktů, a tím selhání vypínače při dalších spínacích pochodech[4].

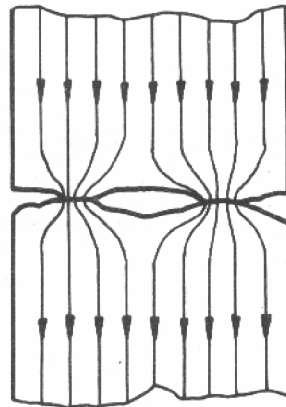
Dalším důvodem vzniku zapínacího oblouku může být nerovnost povrchu spínajících elektrod. Nerovnosti mohou vzniknout při předcházejících spínacích pochodech, kdy nastal přenos materiálu z jedné elektrody na druhou. Přenesený materiál vytváří na povrchu elektrody vyvýšeniny. Při náhodném dotyku těchto vyvýšenin při zapínání může následkem velké proudové hustoty vzniknout velké teplo. Které vyvýšeniny roztaví, popř. vypaří. Při malé rychlosti pohybu elektrod vzhledem k rychlosti vypaření vyvýšenin vznikne v mezeře po vypaření materiálu elektrický oblouk opět stejným způsobem jako při oddalování kontaktů[4].

Vypínání

Podle vzniku vypínacího oblouku můžeme spínací přístroje rozdělit do tří základních skupin: na pojistky, svodiče přepětí a přístroje se spínacími kontakty.

Vznik oblouku mezi kontakty

V zapnutém stavu jsou kontakty vypínače navzájem přitlačovány silou kontaktní pružiny. Tato síla deformuje současně pružně a plasticky materiál v oblasti styku kontaktů. Proud neprochází celou plochou kontaktů, ale pouze určitým počtem mikroskopicky malých kontaktních plošek následkem nerovnosti povrchu elektrod (Obr. 5.)[4].



Obr. 5. Kontaktní plochy na povrchu elektrod

Během vypínacího pochodu se zmenšuje síla kontaktní pružiny, kontakty se pohybují v mezích pružné deformace materiálu, zmenšuje se velikost a počet vodových plošek. Vzdůstá kontaktní odpor, zvětšuje se ohřívání kontaktních můstků Jouleovým teplem[4].

Jsou-li kontakty vyrobeny z materiálu s nízkou teplotou tavení (měď, stříbro), může v okamžiku rozpojování vzniknout můstek z roztaveného kovu a oblouk vznikne stejným postupem jako v pojistce[4].

V případě, že kontakty jsou vyrobeny z materiálu s vysokou teplotou tavení (wolfram, uhlík), nebo nevzniknou-li můstky z roztaveného kovu, je v místech posledního styku kov vyhřát na teplotu blízkou teplotě tavení a ve vyhřátých místech je energie potřebná pro uvolnění elektronu malá. Z elektrody, která je v okamžiku rozpojení kontaktů katodou, jsou elektrickým polem vytrhovány elektrony a po urychlení vytvoří elektronovou lavinu a vznikne oblouk[4].

V obou případech jsou elektrody na počátku vytváření výboje teplé, vznikne tedy oblouk i při nízkých napětích na elektrodách na fyzikálním principu tepelné ionizace.

3.2.2 Statická a dynamická charakteristika oblouku

Charakteristika výboje je křivka znázorňující závislost napětí na elektrodách na proud procházejícím obloukem. Podle druhu napájecího napětí rozlišují se dva druhy charakteristiky: statická a dynamická. Statická charakteristika popisuje poměry ve výboji hořícím v obvodu stejnosměrného proudu, dynamická v obvodu střídavého proudu.

Statická charakteristika

Statická charakteristika oblouku se principiálně skládá ze dvou částí: z klesající, probíhající v oblasti malých proudů. A stoupající, probíhající v oblasti velkých proudů. Klesající větev má tvar hyperboly, stoupající je přímková[4].

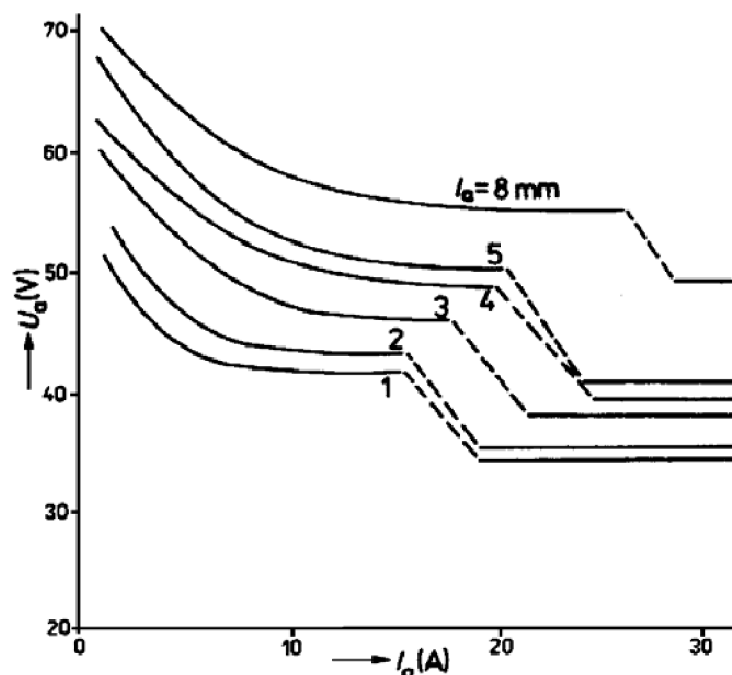
Experimentálně se stanovením charakteristiky v oblasti malých proudů zabývala Ayrtonová. Empiricky odvodila výraz pro charakteristiku:

$$U_a = \alpha + \beta I_a + \frac{\gamma + \delta I_a}{I_a}$$

kde I_a je proud procházející obloukem. L_a délka oblouku, α , β , γ a δ jsou konstanty závislé na druhu a tlaku plynu, ve kterém oblouk hoří, na materiálu, tvaru a rozměrech elektrod. Hodnoty konstant rovnice a charakteristika Ayrtonové pro měď a uhlík ve vzduchu jsou uvedené v tabulce 1., a na obrázku 6.

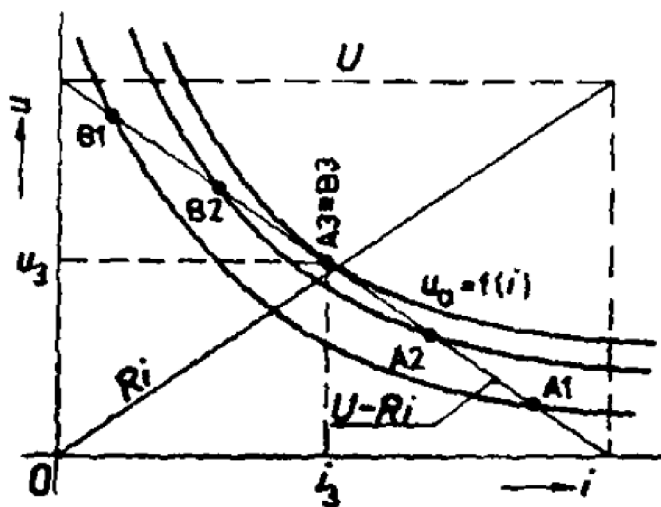
Elektrody - prostředí	α (V)	β (V/m)	γ (W)	δ (W/m)
Cu-vzduch	17	2000	22	18000
C-vzduch	40	1200	20	10000

Tab. 1 Konstanty rovnice Ayrtonové



Obr. 6 Charakteristiky elektrických oblouků změřené Ayrtonovou

Na obrázku 7. je znázorněna statická charakteristika stejnosměrného oblouku. Pro uvedení obvodu do labilního stavu musíme dosáhnout splnutí bodu A (bod stabilního hoření oblouku) a bodu B (bod labilního hoření oblouku). Prakticky lze tohoto stavu dosáhnout pouze změnou charakteristiky oblouku směrem k vyšším napěťovým hodnotám, a to tak, že působením na oblouk zvětšíme 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 ještě oblouk může hořet. Při zmenšení proudu pod tuto velikost se obvod dostává do labilního stavu, nestačí dodávat do oblouku tolik energie, aby byla udržena rovnováha ionizačních pochodů a deionizačních pochodů, proud se zmenšuje k nule a rekombinace proběhne až do konce[2].

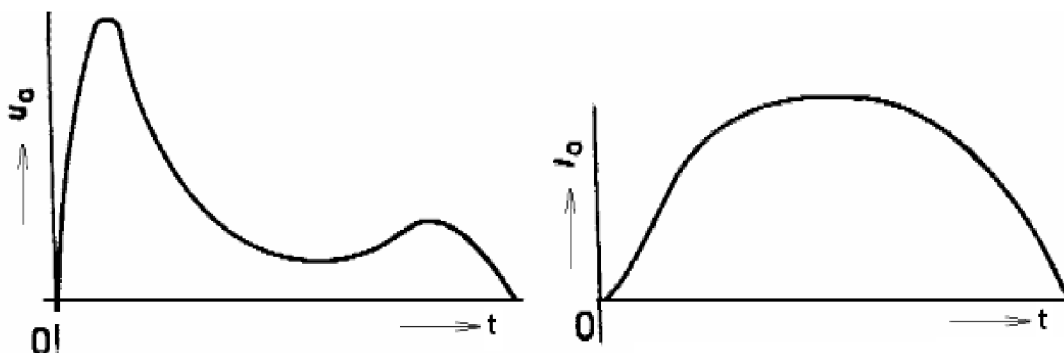


Obr. 7. Statická voltampérová charakteristika

Podmínkou úspěšného vypnutí stejnosměrného obvodu je velké obloukové napětí vypínacího oblouku. Zvětšování obloukového napětí je způsobeno zvětšováním odporu oblouku, tedy zmenšováním průřezu oblouku, zvětšováním jeho délky a intenzivním chlazením oblouku. Následek toho je zmenšování proudu procházejícího vypínaným obvodem až dojde k přerušení oblouku.

Dynamická charakteristika

Problém stability střídavého oblouku je mnohem složitější než u stejnosměrného oblouku, protože napětí a proud jsou periodickými funkcemi času.

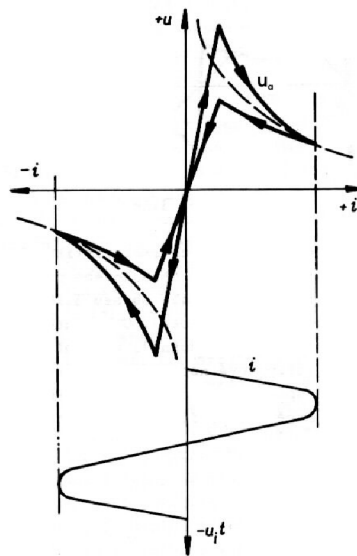


Obr. 8 Časový průběh napětí a proudu oblouku napájeného střídavým proudem

Průběh napětí a proudu v oblouku hořícím v obvodu střídavého proudu je znázorněn na obr. 8. Charakteristika, která stejně jako u oblouku napájeného stejnosměrným proudem vyjadřuje závislost napětí na oblouku na proudu jím procházejícím je znázorněna na obr. 9[4].

Na začátku půlperrody stoupá napětí na elektrodách souhlasně se síťovým napětím až do napětí potřebného pro zapálení oblouku; nazývá se zapalovací napětí. Po zapálení oblouku napětí poklesne na hořící napětí oblouku a po určitou část periody se mění velmi málo. Po dobu, kdy oblouk hoří, se mění proud; znázorněním jeho časového průběhu je mírně deformovaná sinusovka. Na konci půlperrody se napětí nepatrně zvýší, maximální hodnota zvýšeného napětí se nazývá zhašecí špička. V oblasti špičky se proud procházející obloukem blíží k nulové velikosti[4].

Eliminací času z časových průběhů napětí a proudu nebo přímým snímáním oscilografem se dostane výsledná dynamická charakteristika. Z dynamické charakteristiky je patrné, že napětí příslušná oblasti vytváření oblouku jsou vyšší než napětí v oblasti uhasínání oblouku. Při vytváření oblouku musí být napětí na elektrodách tak velké, aby elektrický příkon přiváděný oblouku stačil nejen ke krytí ztrát výboje, ale aby dodával energii umožňující převahu ionizačních pochodů nad rekombinačními. Při ubývajícím proudu mají poměry opačný charakter. Ve výbojové dráze je větší počet nábojů, než je počet nábojů potřebný pro transport příslušné okamžité hodnoty proudu. Z přebývajících nábojů je kryta část ztrát energie oblouku, napětí musí být proto nižší[4].



Obr. 9 Dynamická voltampérová charakteristika

Kromě těchto hysterezních pochodů probíhajících v plazmatu oblouku mají na tvar dynamické charakteristiky vliv: materiál elektrod, délka oblouku, předradník a kmitočet napájecího napětí.

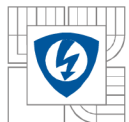
S rostoucím kmitočtem se dynamická charakteristika blíží přímce procházející počátkem a současně se zmenšuje zapalovací špička.

3.3 Vypínání elektrického obvodu s obloukem

3.3.1 Vlastnosti vypínacího oblouku

Vypínání silnoproudého elektrického obvodu spínačem je doprovázeno vznikem elektrického oblouku mezi jeho kontakty. Vypínací oblouk realizuje vlastní přerušení obvodu přechodem z vodivého stavu při zapnutém vypínači do nevodivého stavu po uhasnutí oblouku mezi oddálenými kontakty vypínače. Úspěšné vypnutí závisí na několika činitelích. Hlavním z nich je mechanická a tepelná spolehlivost funkčních dílů vypínače spolu s úspěšným zvládnutím vypínacích pochodů vedoucích k obnovení elektrické pevnosti média mezi kontakty vypínače.

Z hlediska vypínače musíme oblouk považovat za nežádoucí element. Plazma silnoproudého oblouku má vysokou teplotu, jež způsobuje velké opotřebování kontaktů během vypínacího pochodu. Rozsah opotřebení je závislý na velikosti vypínacího proudu a na době trvání oblouku mezi elektrodami.



Při komplexním posuzování celého vypínacího pochodu musíme uvažovat i některé pozitivní vlivy přítomnosti elektrického oblouku ve vypínacím pochodu. Je to přeměna převážně části elektromagnetické energie akumulované v obvodu v energii tepelnou, která je snadněji zvládnutelná než napětí, které by vzniklo při vypínání bez oblouku. Tento jev je nejnežádoucí při vypínání stejnosměrného obvodu. Hlavním problémem zvládnutí vypínacího pochodu zůstávají ale tepelné účinky oblouku.

3.3.2 Zánik elektrického oblouku

Pro vznik a existenci elektrického oblouku je nutné vytvořit mezi elektrodami vypínače elektricky nabitě částice umožňující průchod elektrického proudu ve výbojové dráze mezi elektrodami. Podmínkou vzniku oblouku jsou ionizační pochody v prostoru mezi elektrodami. Ionizační pochody probíhají současně s pochody opačného charakteru, vedoucími k zniku nabytých částic; souborně se nazývají deionizačními. Hlavními z nich jsou difúze částic z tepelných oblastí v okolí osy plazmatu oblouku do studenějších okrajových oblastí a s tím spojená rekombinace[4].

Podmínkou uhasnutí oblouku je převaha deionizačních pochodu nad ionizačními. Rekombinace je opačný pochod vzhledem k ionizaci. Kladný iont a záporný elektron se při ní spojí, vznikne neutrální atom a uvolní se energie spotřebovaná na ionizaci. V jakou energii se uvolněná energie změní, závisí na okolnostech, za kterých dochází k rekombinaci[4].

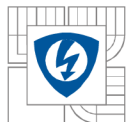
Rekombinace může nastat na elektrodě, v prostoru vyplněném plazmatem a na okraji plazmatu, tvořeném buď pevnou stěnou, nebo rozhraním plazmatu a okolního prostředí. Ve většině případů probíhá rekombinace na účasti tří částic. Charakteristikou takového rekombinačního pochodu, nazývaného potrojná srážka, je převzetí rekombinační energie třetí částicí. Není-li v bezprostředním okolí rekombinujícího iontu žádná třetí částice nebo stěna, která by mohla absorbovat uvolněnou energii, uvolněná energie se z plazmatu vyzáří jako světlo[4].

Nastane-li rekombinace v bezprostředním okolí elektrody, předá se uvolněná energie jako teplo elektrodě. Tento pochod spolu s přeměnou kinetické energie částic dopadajících na elektrody v teplo má za následek ohřátí elektrod na poměrně vysokou teplotu[4].

Hlavním úkolem zhašedla je odvod energie uvolněné při rekombinačních pochodech a urychlení spontánně probíhajících difúzních pochodů v plazmatu. Difúzních pochodů se nezúčastňují pouze ionty, ale i neutrální částice, popř. molekuly plazmatu. Difúze neutrálních částic způsobuje odvádění tepla z vnitřku plazmatu směrem k jeho okrajům. Každá částice neutrální i elektricky nabitá vynáší z plazmatu energii totožnou s její kinetickou energií a tuto předává srážkami částicím v okolí plazmatu. Podle kinetické teorie plynů je energie vynesena částicí řádově jednotky elektronvoltů. U nabitých částic je tato energie zvětšena o ionizační energii příslušného druhu neutrálních částic, popř. disociační energii molekuly, ze které vznikla. Protože částice se pohybují z oblasti s vyšší teplotou do oblasti s teplotou nižší ve směru poloměru plazmatu, nastane radiální difúze částic účinně podporující deionizaci.[4]

3.3.3 Principy deionizace výbojové dráhy v přístrojích

Jeden z principů deionizace je radiální difúze částic. Tento způsob deionizace probíhá v plazmatu oblouku spontánně. Úkolem zhašedla je tento pochod podpořit odváděním tepla z povrchu plazmatu jeho ochlazováním zhašecím médiem.



Při vypínání malých proudů řádově jednotek A stačí spontánní radiální difúze uhasit oblouk. Při vypínání proudů desítek A a větších musí mít ochlazování velkou účinnost, protože při ochlazování povrchu oblouku se zvyšuje teplota jeho plazmatu. Tento zdánlivě paradoxní jev pochopíme, uvážíme-li, že ochlazováním povrchu plazmatu se zmenšuje poloměr výbojové dráhy. Proud udržující oblouk prochází plazmatem s menším poloměrem a následkem toho větším odporem, Jouleovo teplo uvolněné v plazmatu se zvětší, a tím se zvýší i teplota plazmatu. Při vyšší teplotě se zvětší výměna energie mezi plazmatem a okolím. Pokud je chladící médium schopné odvést zvětšený přísun tepla, zmenší se poloměr a celý děj se opakuje, až oblouk přestane existovat. Účinnost ochlazení povrchu plazmatu se zvětší vzájemným pohybem chladícího média a plazmatu zhaseného oblouku. Podle způsobu, jakým se vyvolává vzájemný pohyb zhaseného plazmatu a zhasecího média, rozeznáváme dva základní principy zhasedel: zhasedla s vlastní energií a zhasedla s cizí energií[4].

Ve zhasedlech s vlastní energií se pohyb vyvolává energií přerušovaného obvodu. Používá se k tomu magnetické pole buzené vypínaným proudem nebo teplo uvolněné v plazmatu oblouku[4].

Ve zhasedlech s cizí energií se vzájemný pohyb vyvolává předem připravenou energií. Je to zásobník se stlačeným vzduchem nebo jiným plynem, nebo napjatá pružina spojená s pístem. Na začátku vypínacího pochodu je stlačitelný plyn vpuštěn do zhasedla a proudí kolem zhaseného oblouku. Ve druhém případě se uvolní pružina a píst žene zhasecí médium do zhasedla[4].

3.4 Fyzikální princip zhasení stejnosměrného oblouku

Obecně platí, že podmínkou uhasnutí oblouku je převaha rekombinačních pochodů nad ionizačními. Protože při vypínání stejnosměrných obvodů jde převážně o dlouhé oblouky, lze zanedbat elektrodové úbytky napětí a považovat za rozhodující vlastnosti plazmatu vypínacího oblouku[4].

Aby oblouk zanikl, je nutné podstatně zmenšit jeho vodivost. Toho lze dosáhnout zmenšením průměru plazmatu oblouku a zvětšením jeho délky.

Průměr plazmatu oblouku se zmenší ochlazováním, což zpravidla realizujeme vyfouknutím oblouku do úzké štěrbině magnetickým polem; současně tím zvětšíme jeho délku a odpor. Podmínka pro intenzitu chlazení plazmatu oblouku se stanoví na základě následující úvahy:

Do obvodu oblouku se zařadí rezistor R; pro napětí na oblouku a pro proud procházející obloukem musí platit

$$U_{\alpha} = U - I_{\alpha}R$$

Odtud pro příkon dodávaný do oblouku

$$P_{\alpha} = I_{\alpha}U_{\alpha} = I_{\alpha}(U - I_{\alpha}R)$$

Změna příkonu v závislosti na proudu vyjde z derivování poslední rovnice podle proudu

$$\frac{dP_{\alpha}}{dI_{\alpha}} = U - 2IR$$

Při zvětšení proudu se příkon potřebný pro udržení oblouku při konstantním chlazení zmenší, protože větší proud způsobuje zvýšení teploty a následkem toho zmenšení odporu[4].

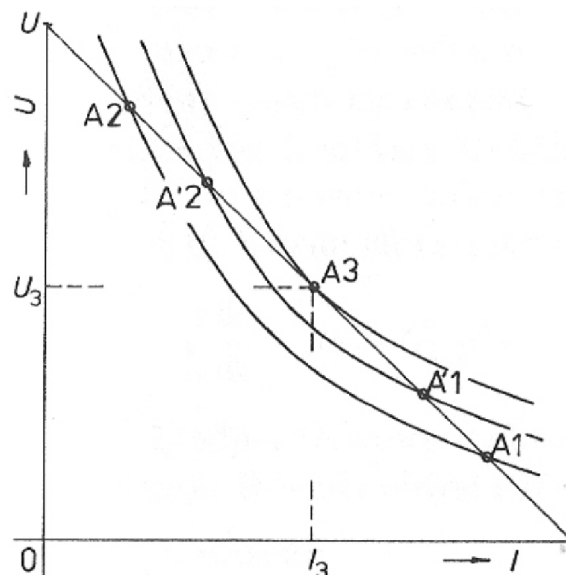
Při konstantním proudu a rostoucím chlazení roste příkon potřebný pro udržení oblouku. Chlazením oblouku se zmenšuje jeho poloměr a roste jeho odpor a zvětšuje se obloukové napětí.

Příkon dodávaný do oblouku se nemůže zvětšovat bez omezení, může dosáhnout pouze určité maximální hodnoty.

Příkon vztažený na dobu existence oblouku se mění v teplo, které pro úspěšné dokončení zhášecího pochodu musí oblouk předat svému okolí.

Předáváním tepla do okolí se oblouk ochlazuje a při dostatečně velkém odvodu tepla dosáhneme toho, že rekombinační pochody převládají nad ionizačními, v plazmatu se zmenšuje počet nabitých částic a zvětšuje se odpor plazmatu až do hodnoty, při které oblouk zaniká[4].

Skutečnost, že zvětšování odporu oblouku až do hodnoty, při které oblouk přestane existovat, je nutnou podmínkou pro vypnutí stejnosměrného obvodu; vyplývá z chování charakteristiky při rostoucím odporu oblouku R_a .



Obr. 10 Vliv délky a odporu oblouku na tvar statické charakteristiky

Zvětšování odporu oblouku posune jeho charakteristiku směrem k vyšším napětím. Bod A_1 , ve kterém je oblouk ve stabilním stavu, a bod A_2 se přibližují s při odporu velikosti R_{a3} splynou v bodu A_3 , který určuje minimální napětí U_3 a proud I_3 , při kterém oblouk může existovat. Dalším zvětšením odporu se charakteristika přesune do oblasti nestability a oblouk zanikne[4].

Způsob, jak docílit žadáných poměrů pro uhasnutí oblouku je nejlépe patrný upravíme-li rovnici Ayrtonové na tvar

$$u_a = \left(\alpha + \frac{\gamma}{I} \right) + l_a \left(\beta + \frac{\delta}{I} \right) = u_s + E_a l_a$$

kde u_e je celkový úbytek napětí na elektrodách. Vidíme, že změny charakteristiky oblouku lze dosáhnout třemi způsoby: změnou úbytku napětí na elektrodách, změnou gradientu oblouku a změnou délky oblouku[4].

Zvýšení úbytků napětí na elektrodách lze dosáhnout 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[4].

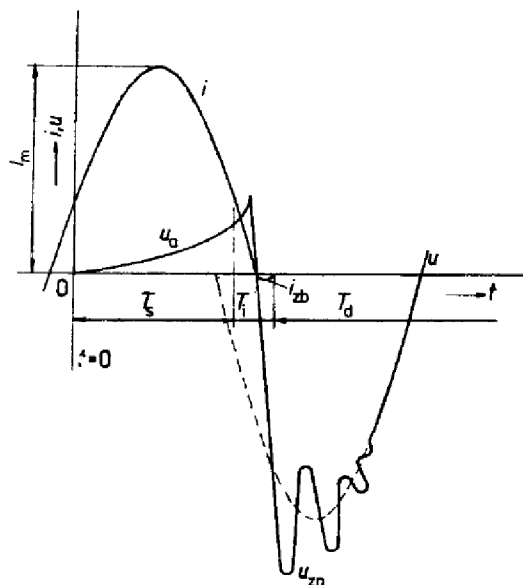
Zvýšení gradientu oblouku lze dosáhnout zvýšením chlazení oblouku. Intenzivního chlazení oblouku docílíme tak, že oblouk uvedeme do těsného styku s chladnými izolačními stěnami. Účinek je tím vyšší, čím užší je štěrbin[4].

Zvětšování délky oblouku se provádí vhodnou úpravou tvaru kontaktů a zhášecí komory.

3.5 Fyzikální princip zhášení střídavého oblouku

Metody používané pro zhášení stejnosměrného oblouku je možné používat i pro zhášení střídavého oblouku. V praxi se tyto metody používají v některých úpravách magnetických vypínačů nízkého napětí. Použitelnost tohoto principu je napěťově omezena konstrukčními hledisky, protože při vysokých napětích by zhášený oblouk dosahoval neúnosné délky a vypínač by musel mít takové rozměry, že jeho konstrukce by byla neekonomická[4].

Při zhášení oblouku v obvodu střídavého proudu (obr. 11.) se využívají obecně skutečnosti, že při průchodu proudu nulou oblouk uhasíná. Je tedy teoreticky možné vypínat střídavý obvod bez průvodních výbojových jevů, rozpojením kontaktů v okamžiku, kdy proud prochází nulou, a jejich rychlým oddálením, aby vlivem zotaveného napětí, které se objeví na elektrodách po uhasnutí oblouku, nenastal elektrický průraz vedoucí k opětovnému zapálení oblouku. Vypínače pracující na tomto principu se nazývají synchronizované. Laboratorně byly tyto vypínače vyzkoušeny, ale jejich praktické provedení je složité, pro obtížnou dosažitelnost potřebného urychlení kontaktů na rychlost nutnou pro úspěšné vypnutí[4].



Obr. 11 Zhášení střídavého oblouku

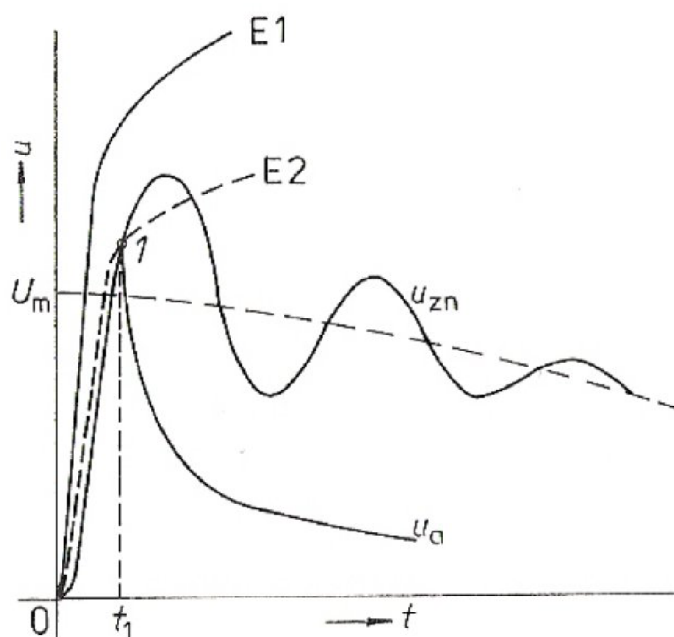
U běžně používaných vypínačů není splněna ani podmínka synchronizace, ani velkého urychlení kontaktů. Náhodně může dojít k oddělení kontaktů v oblasti nuly proudu, rychlost vzdalování kontaktů však nezaručuje, že vlivem nárůstu zotaveného napětí nenastane elektrický průraz a opětné zapálení oblouku. Oblouk vznikne vždy, pokud tomu nezabráníme vhodnou konstrukcí zhášecí komory[4].

Plazma oblouku ve zhašecí komoře je po nule proudu ovlivňováno dvěma protichůdnými vlivy. Prvním z nich je vliv zhašecího média, podporujícího rekombinační pochody, zvětšující jeho elektrickou pevnost, druhým je elektrické namáhání zotaveným napětím[4].

3.5.1 Podmínky pro uhasnutí oblouku

Podmínkou úspěšného vypnutí je rychlejší vzrůst elektrické pevnosti než rychlost růstu zotaveného napětí. Grafické znázornění je na obr. 12. Křivka E1 znázorňující časový průběh zotavující se elektrické pevnosti, by měla mít vždy větší velikost než křivka u_{zn} , znázorňující časový průběh zotaveného napětí[4].

Případ vedoucí k selhání vypínacího pochodu ilustruje křivka E2. V okamžiku T1 elektrostatické síly pole vytvořeného zotaveným napětím způsobí urychlení iontů a elektronů v plazmatu, ionizačními pochody převládnu nad rekombinačními a oblouk se znovu vytvoří. Zotavené napětí přestane existovat, na elektrodách se objeví napětí oblouku u_a . Znovu zapálený oblouk hoří až do další nuly proudu, kdy se pochody opakují. Definitivně oblouk uhasne tehdy, až převládnu deionizační pochody nad ionizačními a vzrůst zotavující se elektrické pevnosti je dostatečně rychlý[4].

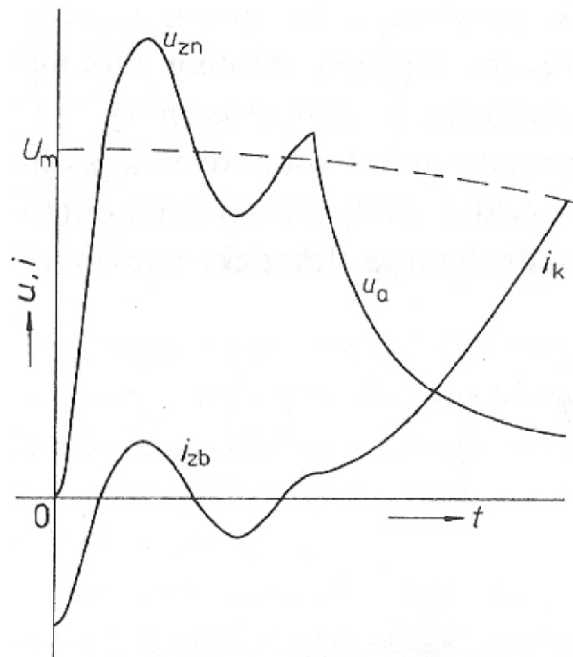


Obr. 12 Podmínky úspěšného uhasnutí oblouku

Poměry ve skutečném vypínací nejsou tak jednoduché, jak bylo uvedeno. Hlavním problémem je otázka elektrické pevnosti výbojového prostoru. Obvyklá definice elektrické pevnosti nevyhovuje, protože v prvních okamžicích po nule proudu je prostor mezi elektrodami vyplněn plazmatem s poměrně velkým stupněm ionizace, je tedy elektricky vodivý. Vlivem zotaveného napětí prochází výbojovým prostorem malý proud, který se nazývá zbytkový. Jeho velikost závisí na vodivosti plazmatu mezi elektrodami a na zotaveném napětí. V tomto případě nerozhoduje o opětovém zapálení zotavené napětí a zotavující se elektrická pevnost prostoru mezi elektrodami[4].

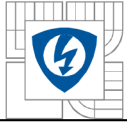
Případ tohoto druhu je znázorněn na obr. 13. K průrazu a opětovnému zapálení oblouku došlo až po několika kmitech zotaveného napětí a nikoli během růstu zotaveného napětí do maximální hodnoty. Z obrazu je patrné, že po dvou kmitech zotaveného napětí se prudce začíná zvětšovat

zbytkový proud a přechází do proudu zkratového, zotavené napětí se zmenšuje a přechází do obloukového[4].



Obr. 13 Oscillogram napětí a proudu vypínacího pochodu

Závěrem lze konstatovat, že pro převážení rekombinačních pochodů nad ionizačními, tj. pro úspěšné dokončení vypínacího pochodu, je nutné, aby celková tepelná energie odvedená okolním prostředím z plazmatu vypínajícího oblouku byla větší než energie přivedená obvodem do plazmatu[4].



4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Současný trend vývoje výkonových spínacích přístrojů na nízké napětí (jističů) směřuje směrem k minimalizaci jejich rozměrů a aplikaci elektronických prvků pro jejich řízení, monitorování a diagnostiku. Otázka zmenšení rozměrů přístroje úzce souvisí s účelně propracovaným systémem pro zhášení elektrického oblouku ve výkonovém obvodu. Pod pojem zhášecí systém, pro jeden pól přístroje, v této souvislosti zahrnujeme kontaktní systém včetně tvarované proudové dráhy a zhášecí komoru. V podstatě se jedná o řešení problému optimální miniaturizace tohoto systému za podmínky minimalizace propuštěné elektrické energie při vypínacím procesu, tj. intenzivního zhášení elektrického oblouku. Tato problematika však úzce souvisí s dosažením optimálních podmínek interakce elektrického, magnetického a termodynamického pole uvnitř i vně přístroje.

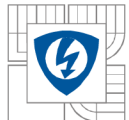
Tato stručná charakteristika problému charakterizuje předmět intenzivního studia předních světových pracovišť v této oblasti. Dlužno podotknout, že tato pracoviště jsou úzce navázána na renomované světové výrobce [např. Universita Braunschweig & Moeller (D), Universita Paul Sabatier & Group Schneider (F), ve Slovenské republice potom Technická Universita Bratislava & SEZ Krompachy]. Také v našich podmínkách tato návaznost existuje, konkrétně v podobě spolupráce FEKT VUT a OEZ Letohrad a.s.

Pozornost jednotlivých pracovišť se soustřeďuje na vytvoření teoretického modelu chování elektrického oblouku v podmínkách vnějších polí [6,7]. Metody řešení jsou teoreticko-experimentální, kdy na základě teoretických předpokladů jsou experimentálně ověřovány konkrétní konstrukční varianty. Dosud publikované výpočtové modely jsou sestaveny za předpokladu značných zjednodušení. Prvním problémem je zanedbání dynamického chování pohyblivého kontaktu a úvaha, že oblouk hoří již na plně otevřených kontaktech. Další zjednodušení spočívá v zanedbání jevů probíhajících před vznikem katodových a anodových skvrn na každém plechu zhášecího roštu. Uvedený jev byl sice experimentálně prozkoumán [8], ale dosud není spolehlivě implementován do modelu.

4.1 Pohyb oblouku po elektrodách a ve zhášecí komoře

Funkce výkonových spínacích přístrojů na nízké napětí je úzce spjata s pohybem elektrického oblouku ve všech fázích vypínacího procesu. Pohyb oblouku je, z fyzikálního pohledu, vyvolán elektrodynamickou silou vzniklou interakcí magnetického pole oblouku a vnějšího magnetického pole proudové dráhy (a nebo cívky, která je součástí proudové dráhy). Vznik a následný pohyb oblouku je možné posoudit ze záběrů rychlostní kamery a jeho vývoj dokumentuje obrázek 14[5].

V první fázi, v okamžiku rozpojování kontaktu se zmenšuje přitlačná síla, čímž dochází i ke zmenšování stykových ploch kontaktů, zvyšuje se přechodový odpor, úbytek napětí na kontaktech a tím také jejich teplota. Postupně se vytváří několik můstků z roztaveného materiálu, které se během velice krátké doby rozpadají ($10^{-6} - 10^{-5}$ s) a přecházejí do plynného skupenství. V tomto prostředí mezi kontakty vzniká některý z druhů výbojů. Jestliže napětí a proud převyší kritické hodnoty obloukového výboje, vzniká mezi kontakty elektrický oblouk. Roztavené části kontaktů jsou zdrojem tepelné emise elektronů, a jestliže je katoda silně rozehřátá, pak průměr



jádra oblouku a jeho elektrodoových oblastí je přibližně stejný. V takovém případě je oblouk málo pohyblivý a při jeho přemísťování se přemísťuje i hranice roztavené oblasti na kontaktech. Ionizační procesy v těchto okamžicích probíhají na základě termoelektrické emise, pro kterou je charakteristický malý úbytek napětí na katodě a malá intenzita elektrického pole u katody. Jestliže intenzita u elektrického pole převyšuje hranici, kdy dochází k uvolňování elektronů z katody, přechází mechanismus ionizace na autoemisi, při které může oblouk existovat i na poměrně chladné katodě. Pro tento druh obloukového výboje je charakteristická jeho vysoká pohyblivost[5].

Na základě těchto fyzikálních dějů rozeznáváme tři fáze pohybu oblouku po kontaktech:

- Fáze ulpění oblouku na kontaktech při začátku jejich oddalování
- Fáze pomalého pohybu oblouku po kontaktech (při tepelné emisi elektronů)
- Fáze pohybu oblouku po kontaktech s velkou rychlostí (při autoemisi)

S rostoucí vzdáleností kontaktů a velikostí intenzity magnetického pole narůstá i rychlost pohybu oblouku po kontaktech a tím roste i gradient napětí oblouku

Ve druhém údobí vypínacího procesu u magnetických vypínačů je úzce spojena s charakteristickými jevy vypínáčů s vlastní zhášecí energií. Problémem je jednak vypínání proudů v kritické oblasti, kdy se oblouk nedostává do zhášecí komory a naopak vypínání proudů velkých hodnot, kdy poměrně velká energie vyvinutá obloukem způsobí ohřev okolního prostředí a zvýšení jeho tlaku v prostoru zhášecí komory. Nadměrné zvýšení tlaku ve zhášecí komoře může ve svých důsledcích vést až k destrukci celého vypínače[5].

Roštová zhášecí komora

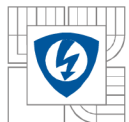
Roštové zhášecí komory mohou být provedeny jako izolační i jako kovové.

Izolační roštová komora je tvořena příčnými izolačními žebry, na nichž se vyfukovaný oblouk zadrží a prodlouží. Vzhledem k tomu že oblouk setrvává na hranách žebor příliš dlouho a na poměrně malé ploše, nedochází k účinnému chlazení oblouku. Hraný žebor se silně zahřívají a postupně vypalují do hloubky, takže při častém vypínání větších proudů dochází k brzkému opotřebení komory. Účinnost tohoto provedení zhášecí komory je omezena zahlcením komory ionizovanými plyny, které mohou být příčinou přeskočení buď uvnitř komory, nebo nad komorou. Zvětšení vypínací výkonnosti tohoto provedení zhášecí komory znamená i nadměrné zvětšování jejich rozměrů, a proto se v současné době tohoto provedení používá zřídka[5].

Kovová roštová komora naopak našla široké uplatnění zejména u přístrojů na nízké napětí, ale také u stejnosměrných rychlovypínačů.

V izolačním pouzdru jsou umístěny kovové příčné desky, mezi které vnikne pohybující se oblouk a rozdělí se na několik dílčích oblouků v sérii.

Rychlost pohybu oblouku nemá výrazný vliv na růst obloukového napětí. Také napětí oblouku je málo závislé na velikosti proudů. Tyto skutečnosti nasvědčují k tomu, že podstatný



vliv na činnost kovové roštové komory mají elektrické a tepelné procesy na jednotlivých elektrodách[5].

Pohyb oblouku má v přístroji i ve zhašecí komoře výrazný vliv na úspěšnost zhašecího pochodu. Pohyb oblouku u spodního okraje zhašecí komory zpomaluje a při malých intenzitách magnetického pole dokonce zastavuje. Tento jev není způsoben pouze aerodynamickými procesy, když oblouk přechází z poměrně široké části zhašecí komory do úzkých mezer mezi žebry roštu. Spolupůsobí také procesy na nově vznikajících elektrodách, kdy plazma oblouku s vysokou teplotou ulpívá na spodním okraji desek. Pro vznik nových katod a anod je zapotřebí vyššího napětí. Potřebné vyšší napětí se na oblouku dospěje ke spodnímu okraji desek, na jejichž okraji se zastaví, sloupec oblouku vniká do prostoru mezi žebry a prodlužuje (zcela nedefinovatelně) svoji délku až do té doby, kdy vznikající rozdíl potenciálů způsobí elektrický průraz mezi deskou a sloupcem oblouku. Na základě tohoto průrazu potom dochází k dělení oblouku[5].

Během tohoto procesu se oblouk pohybuje volně po elektrodách a následně vstupuje do zhašecí komory, která je obvykle řešena jako komora roštová, tj. komora tvořená n – kovovými přepážkami (deskami – vhodného tvaru), ve kterých se oblouk rozdělí na $n+1$ dílčích oblouků. V obr. 14 je tento děj zachycen.



Obr. 14 Vznik a vstup oblouku do zhašecího roštu

Pro studium chování elektrického oblouku nízkého napětí, v průběhu zhašecího procesu bylo rozhodnuto navrhnout nový experimentální model umožňující značnou variabilitu studijních možností. Ideový návrh tohoto modelu je hlavním výsledkem této práce.

5 IDEOVÝ NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO MODELU

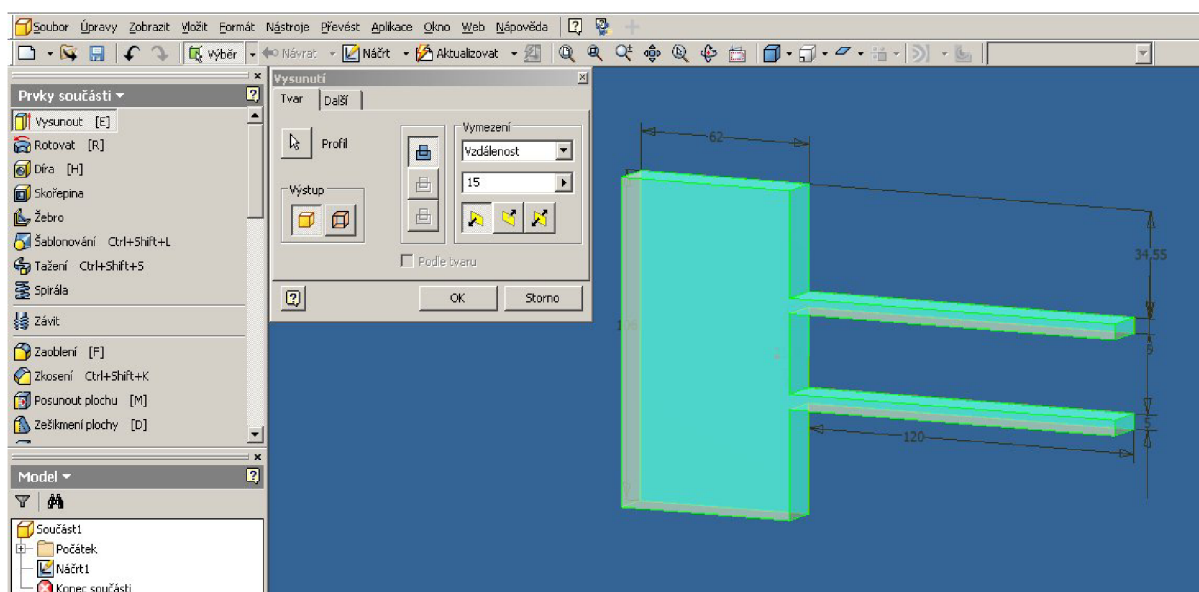
Pro tvorbu 3D modelu zkušebního zařízení byl použit software *Autodesk Inventor 2008*.

Autodesk Inventor je 3D strojírenský modelovací systém založený na kombinaci parametrického a adaptivního modelování. Parametrické modely jsou modely, které jsou matematicky popsány pomocí parametrů. Podstata parametrického modelování spočívá v definování základního náčrtu, ve kterém se vztahy mezi jednotlivými prvky určí pomocí geometrických parametrů – vazeb (např. kolmost, tečnost, rovnoběžnost,...) a rozměrových parametrů – kót. Poté se z náčrtu vytvoří model součásti pomocí 3D modelovacích nástrojů, který je možno dále různě upravovat a následně vytvořit výkresovou dokumentaci. K modelu je možné se kdykoliv vrátit a provést s ním jakoukoliv úpravu. Adaptivní modelování umožňuje vzájemnou provázanost geometrií jednotlivých dílů sestavy pomocí adaptivních vazeb. Znamená to, že pokud například zavedeme adaptivní vazbu mezi délkou pera a délkou drážky v hřídeli, změnou jedné délky se provede automaticky také modifikace té druhé. Díly se prostě navzájem přizpůsobí, adaptují. Odpadá tak zbytečná rutinní práce úpravy dílů a konstruktér se může zcela věnovat modelování.

5.1 Tvorba modelu zhášecí komory

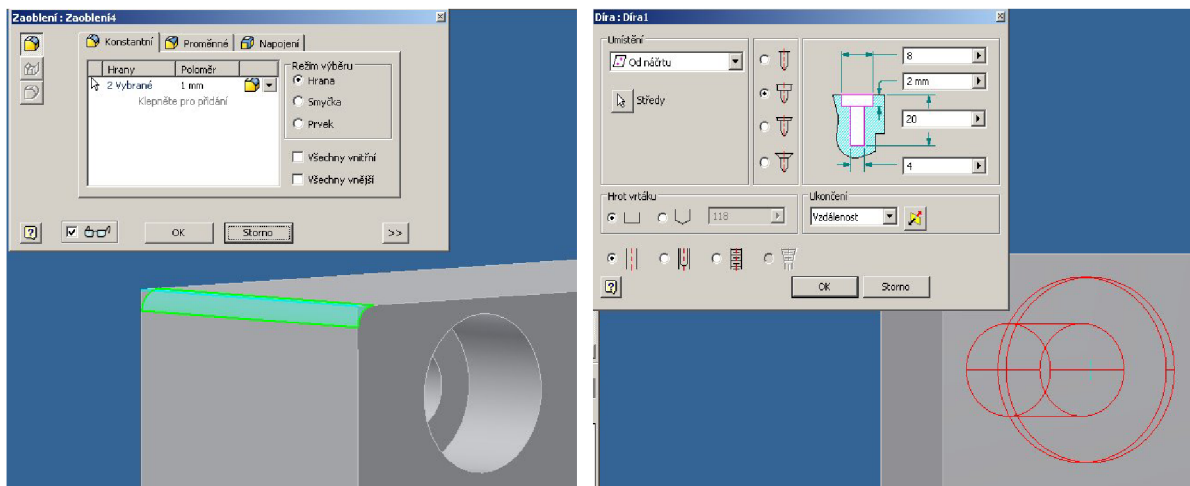
Model zhášecí komory byl navrhnutý tak, aby byl aplikován do nízkonapěťového jističe *MODEION BD 250*. Aby to mohlo být prováděno, byla potřeba vytvoření jedné připevňovací části. Tato připevňovací část je připevněna na jistič, a ke kterému je ještě připevněna samotná komora.

Nejprve je vytvořena horní připevňovací část, která je připevněna k jističi. V režimu *Náčrt*, se nejdříve nakreslí náčrt s odměřenými rozměry, který se po dokončení náčrtu pomocí příkazu *Vysunout* vysune na požadovanou tloušťku (Obr. 15.).



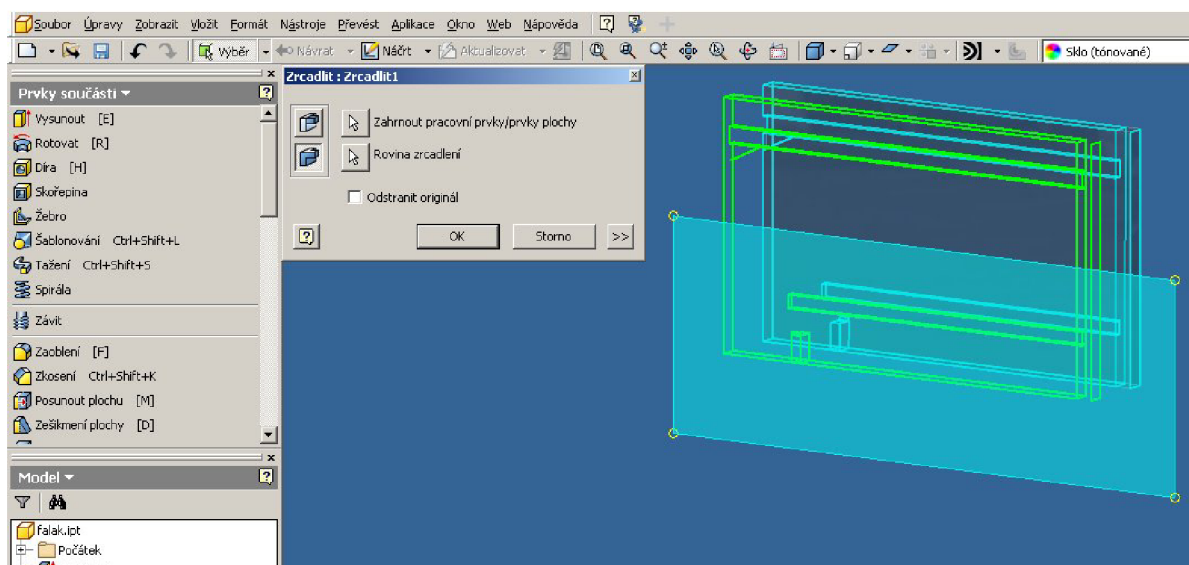
Obr. 15 Model připevňovací části komory

Model se ještě pomocí příkazů *Zaoblení* a *Díra* upraví do konečného tvaru (Obr. 16).



Obr. 16 Použití příkazů *Zaoblení* a *Díra*

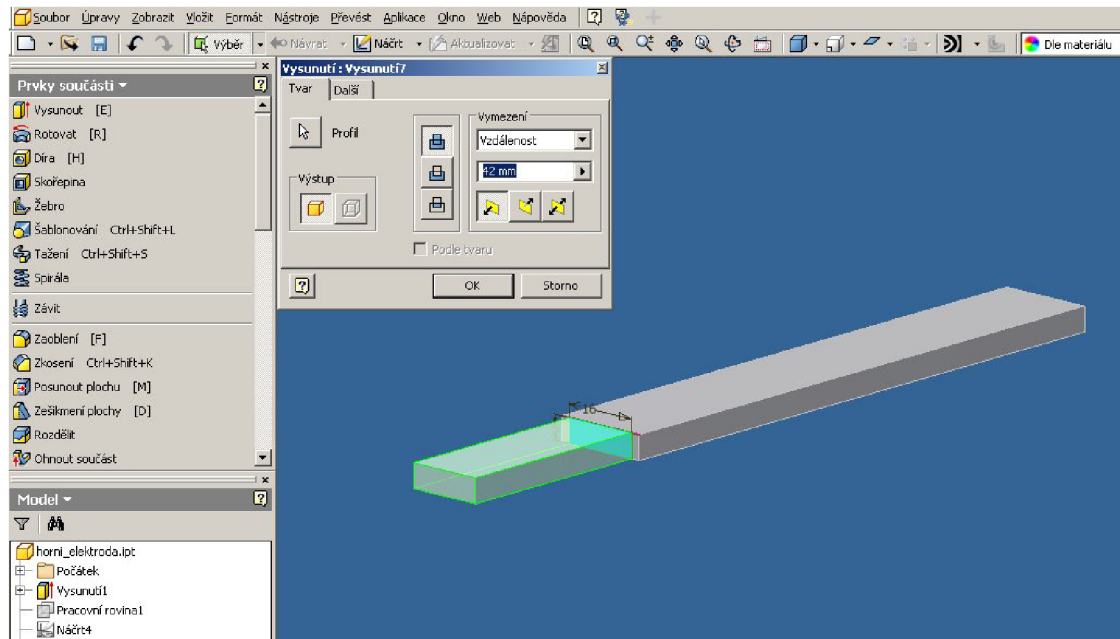
Při vytváření stěn zášecí komory bylo použito stejných příkazů, jak v předchozím případě, při modelování připevňovací části. Přibyl ještě příkaz *Zrcadlení*. Nejdříve byl vytvořen základní náčrt, a pomocí zmíněných příkazů upraven na konečný tvar. Příkazem *Zrcadlení* se zkopírovala namodelovaná strana stěny, a pomocí pracovní roviny byla zrcadlena do požadované vzdálenosti (Obr. 17.).



Obr. 17 Tvorba modelu stěny komory

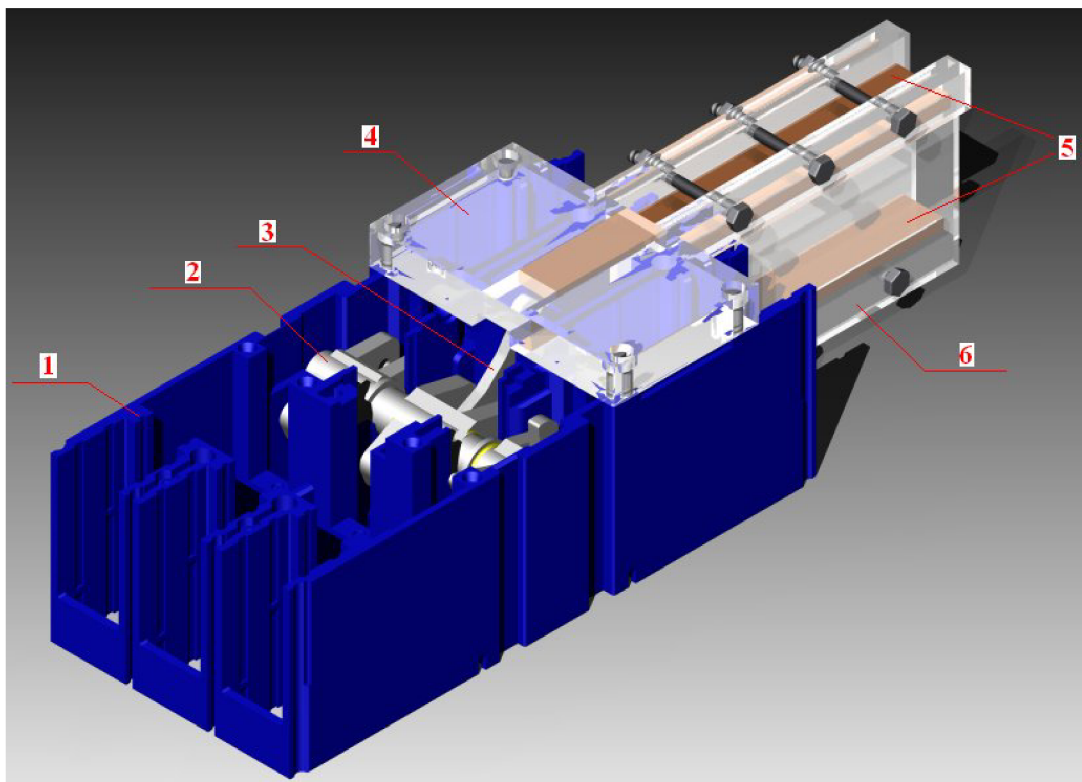
Při vytváření horní elektrody se nejdříve vytvořila rovná část uložená ve stěně komory, v drážkách. A druhá část, která je umístěná při pohyblivém kontaktu, se vytvořila stejně příkazem *Vysunutí* (Obr. 18.).

Dolní elektroda se vytvářela podobně jak horní. Popsat celý postup tvorby všech dílů zášecí komory by bylo příliš složité a zdlouhavé.



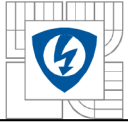
Obr. 18 Tvorba modelu horní elektrody

Po vytváření všech dílů, byla potřeba vytvořit z nich sestavu. V sestavách se pracuje s díly zhášecí komory (přípevňovací část, stěny komory a elektrody). Mezi díly sestavy se vytvářejí vazby, a tím odstranění stupňů volnosti součástí. Po správném udělení vazeb součástí, celý model dostane konečný tvar (Obr. 19.).



Obr. 19 Sestava zhášecí komory aplikovaná do jističe MODEION BD 250

1-základna jističe MODEION BD 250, 2-sestava hřídele, 3-pohyblivý kontakt, 4-přípevňovací část, 5-elektrody, 6-stěny zhášecí komory



Hlavní rozměry zhášecí komory jsou znázorněny v příloze P1 a P2.

Pro názornost, jak se pracuje se systémem *Autodesk Inventor*, postačí uvedené postupy. Zde se zmíníme o tom, z jakých částí se skládá model dané zhášecí komory.

Přípevňovací část a stěny komory

Pro variabilitu byla vytvořena zhášecí komora tak, aby se snadno rozebírala. Samotná komora se uvolní pomocí šroubu, pomocí kterých je připevněna k přípevňovací části sestavy. Vnitřní strany stěny komory jsou vybavené drážkami, pro umístění horní a dolní elektrody.

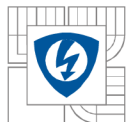
Navrhnutý materiál je polyakrylát, kvůli své pevnosti, průhlednosti a kvůli své odolné vlastnosti vůči tepelným účinkům oblouku.

Elektrody

Horní elektroda se skládá z dvou částí. První část je umístěna, a tím připevněna ke komoře. Druhá se nachází v kontaktním prostoru. Dolní elektroda je připevněna k dolnímu pevnému pásu. Stabilitu v komoře ujistí stejně drážka na vnitřní straně komory, jak při horní elektrodě.

Vybraný materiál pro elektrody byl měď.

Model byl navrhnutý a nadimenzován pro aplikaci v tělese jističe typu MODEION BD 250. Je zcela jednoduchý, umožňuje snadnou montáž a velkou variabilitu provedení. Stěny komory jsou průhledné a umožňují aplikaci metod optické diagnostiky, zejména rychlostní fotografie.



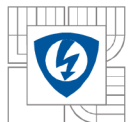
6 ZÁVĚR

V této práci se zmínilo o počátečních teoriích elektrických přístrojů, o základních vlastnostech elektrického oblouku, jejich vznikem a podmínkami pro úspěšné uhasnutí, jak v stejnosměrném, tak ve střídavém obvodu. Dále o experimentálních průzkumech vlastností elektrického oblouku v zhášecích komorách. A na konec o návrhu jedné zhášecí komory, aplikovatelnou pro jistící přístroj *MODEION BD 250*.

Cílem této práce bylo vytvořit experimentální model, s využitím konstrukčních dílců jističe *MODEION BD 250* (OEZ Letohrad). Model byl navrhnutý podle základních rozměrů přístroje tak, aby umožňoval kompletní studium chování a vlastností elektrického oblouku, zejména pohyb oblouku po elektrodách v zhášecí komoře. Pomocí modelovacího programu Autodesk Inventor byl vytvořen 3D model navržené zhášecí komory. Pak se z navrhnutého 3D modelu se vytvořili výkresy s přesnými rozměry jednotlivých částí zhášecí komory.

Model se skládá ze tří částí. Z elektrod, ze zhášecí komory, do čeho jsou vloženy elektrody, a z přípevňovací části, přes kterou je připevněná zhášecí komora s elektrodami k základně jistícího přístroje. Materiál stěny je polyakrylát, pro průhlednost při pozorování pohybu oblouku v komoře.

Model bude vyroben na UVEE FEKT VUT v rámci řešení projektu MŠM 0021630516 a výrazně rozšíří možnosti zkoumání vlastností oblouku v zhášecí komoře spínačů na nízké napětí.



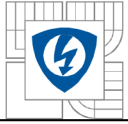
7 LITERATURA

- [1] NOVOTNÝ, V., VÁVRA, Z. *Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí*. 1986. vyd. Praha: SNTL, 1986. 270 s.
- [2] VÁVRA, Z. *Vysoké napětí a elektrické přístroje: Část II Elektrické přístroje*. vyd. 2003. 83 s.
- [3] BUL B. K. a kolektiv. *Elektrické přístroje: Základy teorie*. Doc. Ing. Vladimír Suchánek, CSc. Praha: SNTL, 1977. 534 s.
- [4] HAVELKA, O. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL/ALFA, 1985. 440 s.
- [5] VÁVRA, Z. *Poskytnuté podkladové materiály*. Brno, 2009
- [6] LINDMAYER, M., et al: Low-voltage Switching Arcs – Experiments and Modeling. In *Proceedings of the XVTH Symposium on Physics of Switching Arc*, Volume II – Invited Papers, Brno 2003, p. 252-267, ISBN 80-214-2307-2
- [7] ANHEUSER, M., et al: Arc Simulations in Realistic Low-voltage Arcing Chambers. In *Proceedings of the XVTH Symposium on Physics of Switching Arc*, Volume II – Invited Papers, Brno 2003, p. 215-221, ISBN 80-214-2307-2
- [8] LINDMAYER, M., et al: Some Aspects of Arc Behaviour in Low Voltage Arc Chutes. In *Proceedings of the XVITH Symposium on Physics of Switching Arc*, Volume II – Invited Papers, Brno 2005, p. 252-267, ISBN 80-214-2931-3



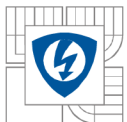
8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zapínání v stejnosměrném obvodu	11
Obr. 2 Zapínání ve střídavém obvodu	11
Obr. 3 Vypínání v stejnosměrném a ve střídavém obvodě.....	12
Obr. 4 Průběh potenciálu v oblouku.....	17
Obr. 5. Kontaktní plochy na povrchu elektrod	19
Obr. 6 Charakteristiky elektrických oblouku změřené Ayrtonovou	20
Obr. 7. Statická voltampérová charakteristika	21
Obr. 8 Časový průběh napětí a proudu oblouku napájeného střídavým proudem	21
Obr. 9 Dynamická voltampérová charakteristika	22
Obr. 10 Vliv délky a odporu oblouku na tvar statické charakteristiky.....	25
Obr. 11 Zhašení střídavého oblouku	26
Obr. 12 Podmínky úspěšného uhasnutí oblouku	27
Obr. 13 Oscilogram napětí a proudu vypínacího pochodu.....	28
Obr. 14 Vznik a vstup oblouku do zhašecího roštu.....	31
Obr. 15 Model přípeňovací části komory	32
Obr. 16 Použití příkazů Zaoblení a Díra	33
Obr. 17 Tvorba modelu stěny komory	33
Obr. 18 Tvorba modelu horní elektrody.....	34
Obr. 19 Sestava zhašecí komory aplikovaná do jističe MODEION BD 250.....	34



9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Konstanty rovnice Ayrtonové	20
--	----



10 PŘÍLOHY

Příloha 1 Zhášecí komora se základnou	40
Příloha 2 Zhášecí komora	41