VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

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

VYHODNOCOVÁNÍ CHOVÁNÍ SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE BĚHEM VYPÍNÁNÍ ZKRATOVÉHO PROUDU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN FENDRYCH
AUTHOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VYHODNOCOVÁNÍ CHOVÁNÍ SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE BĚHEM VYPÍNÁNÍ ZKRATOVÉHO PROUDU

EVALUATION OF A SWITCHING DEVICE BEHAVIOUR DURING SHORT-CIRCUIT CURRENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN FENDRYCH

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2014

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:	Martin Fendrych	***ID:***	146815
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Vyhodnocování chování spínacího přístroje během vypínání zkratového proudu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte a uveďte dynamické chování kontaktního systému zadaného přístroje v různých stavech.
2. Navrhněte měření chování kontaktního systému za pomoci vysokorychlostní kamery.
3. Proveďte měření v laboratoři spínacích přístrojů pro zadané proudy.
4. Vyhodnoťte získané výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
[2] Sborníky z konferencí Fyzika spínacího oblouku (FSO)

Termín zadání:	27.9.2013	***Termín odevzdání:***	2.6.2014

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

V práci som sa zameral na princíp zhášania elektrického oblúku v nízkonapäťových prístrojoch. Zvlášť som sa sústredil na problematiku magnetických vypínačov. Ďalej som spracoval po teoretickej stránke problematiku kontaktného systému pri magnetických vypínačoch. V praktickej časti práce som testoval nízkonapäťový modulárny istič typu 2 B a 10B. Testovanie prebiehalo v laboratóriu spínacích prístrojov. Pozoroval som pohyb kontaktu a elektrický oblúk, ktorý horel medzi ním a vodiacou stenou. Pozorovanie bolo zaznamenané pomocou vysokorýchlostnej kamery a osciloskopom. Zo získaných priebehov som vyhodnocoval dynamiku kontaktov, dĺžku elektrického oblúka a veľkosť jeho oblúkového napätia pre rôzne okamihy.

Abstract

At work, I focused on the principle of electric arc extinction in low voltage devices. I particularly focused on the issue of magnetic switches. Next, I processed by the theory site issue of contact system in magnetic switches. In the practical part of my work, I was testing modular low voltage circuit breaker type of 2B and 10B. Testing was carried out in the laboratory of switchgear. I observed the movement of the contact and electric arc, which was burned between them and conductor wall. Observation was recorded by using a high-speed camera and an oscilloscope. Of acquired waveforms, I evaluated the dynamics of contacts, electric arc length and the value of the arc voltage for different moments.

Kľúčové slová

Elektrický oblúk, oblúkové napätie, dĺžka elektrického oblúku, čas, istič, skratová spúšť, nadprúdová spúšť, kontakty, vypínací mechanizmus, elektrodynamická sila, magnetické pole, sila

Keywords

Electric arc, arc voltage, electric arc length, time, circuit breaker, short-circuit trip unit, overcurrent trip unit, contacts, cut-off mechanism, electrodynamics force, magnetic field, force

Bibliografická citácia

FENDRYCH, M. *Vyhodnocování chování spínacího přístroje během vypínání zkratového proudu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému *Vyhodnocování chování spínacího přístroje během vypínání zkratového proudu* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zoznamu literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušení ustanovení § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., spolu s možnými trestnoprávnymi dôsledkami vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa …… Podpis autora ……..

Poďakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jiřímu Valentovi Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa …… Podpis autora ……..

OBSAH

1 ÚVOD **14**

2 VYSOKORÝCHLOSTNÁ KAMERA **14**

2.1 VYSOKORÝCHLOSTNÁ KAMERA PHOTRON FASTCAM SA-X2 ..... **14**

2.1.1 CLONA 16
2.1.2 RÝCHLOSŤ UZÁVIERKY 16
2.1.3 SNÍMACÍ ČIP CMOS 16
2.1.4 NASTAVENIE KAMERY PHOTRON FASTCAM SA-2X 17

3 LABORATÓRIUM VYSOKÝCH PRÚDOV A NAPÄTÍ **17**

3.1 LABORATÓRIUM SPÍNACÍCH PRÍSTROJOV **17**

3.2 SCHÉMA LABORATÓRIA SPÍNACÍCH PRÍSTROJOV **19**

3.2.1 PRÍPOJNICOVÝ SYSTÉM ČÍSLO 1 19
3.2.2 PRÍPOJNICOVÝ SYSTÉM ČÍSLO 2 20
3.2.3 PRÍPOJNICOVÝ SYSTÉM ČÍSLO 3 20

3.3 TECHNICKÉ ZARIADENIA LABORATÓRIA SPÍNACÍCH PRÍSTROJOV **21**

3.3.1 MOTOGENERÁTOR 6KV 21
3.3.2 TRANSFORMÁTORY TT1 A TT2 21
3.3.3 ĎALŠIE TECHNICKÉ ZARIADENIA 22

4 PRINCÍP ZHÁŠANIA SPÍNACIEHO OBLÚKU V NN SPÍNACÍCH PRÍSTROJOCH **23**

4.1 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PRÚDU **23**

4.1.1 ODPUDIVÁ SILA MEDZI KONTAKTMI 24

4.2 ZÁNIK ELEKTRICKÉHO OBLÚKU **25**

4.3 PRINCÍP ZHÁŠANIA STRIEDAVÉHO OBLÚKA **25**

4.3.1 PRINCÍP ZHÁŠANIA STRIEDAVÉHO ELEKTRICKÉHO OBLÚKA PRI MAGNETICKÝCH ZHÁŠADLÁCH 26
4.3.2 MAGNETICKÉ VYPÍNAČE 26
4.3.3 KOVOVÉ ZHÁŠACIE KOMORY 28

4.4 ISTIČE **29**

4.4.1 MODULÁRNY NN ISTIČ 30
4.4.2 KOMPAKTNÝ ISTIČ 31
4.4.3 OBMEDZOVACIE ISTIČE 32

4.5 KONTAKTNÝ SYSTÉM V RÔZNYCH STAVOCH PRI NN ISTIČOCH **33**

4.5.1 KONTAKTNÝ SYSTÉM V ZAPNUTOM STAVE 33
4.5.2 KONTAKTNÝ SYSTÉM VO VYPNUTOM STAVE 34

5 MERANIE NA MODULÁRNOM NN ISTIČI **34**

5.1 SKÚŠKA NA SKRATOVEJ STOLICI PRI U=50V **35**

5.2 SKÚŠKA NA SKRATOVEJ STOLICI PRI U=100V **37**

5.3 SKÚŠKA NA SKRATOVEJ STOLICI PRI U=150V **39**

5.4 ZHRNUTIE **41**

6 NÁVRH MERANIA CHOVANIA KONTAKTNÉHO SYSTÉMU POMOCOU VYSOKORÝCHLOSTNEJ KAMERY 42

6.1 ÚPRAVA ISTIČA 42

6.2 KRYTY 42

6.3 NASTAVENIE KAMERY 42

6.4 POUŽITIE LASERA 43

6.5 SPRACOVANIE ZÁZNAMU 43

6.5.1 PRINCÍP URČENIA OKAMŽITEJ DRÁHY KONTAKTU 43

6.5.2 PRINCÍP URČENIA OKAMŽITEJ DĹŽKY ELEKTRICKÉHO OBLÚKA 45

7 DYNAMICKÉ CHOVANIE KONTAKTNÉHO SYSTÉMU V RÔZNYCH STAVOCH 45

7.1 ISTIČ TYPU 2B 46

7.2 ISTIČ TYPU 10B 48

7.3 ZHRNUTIE 50

8 ZÁVER 51

LITERATÚRA 52

Zoznam obrázkov

Obrázok 2.1-1Veľkosť clony a otvoru clony[2] 16
Obrázok 2.1-2CMOS senzor[3] 17
Obrázok 3.2-1Jednopólová schéma laboratória spínacích prístrojov 19
Obrázok 4.1-1 Sila vťahujúca oblúk do oceľovej štrbiny komory [4] 23
Obrázok 4.1-2Odpudivá sila medzi kontaktmi 24
Obrázok 4.3-1Podmienky úspešného uhasnutia oblúka [4] 26
Obrázok 4.3-2Magnetický vypínač[4] 27
Obrázok 4.3-3Elektrický oblúk v zhášacej komore[4] 29
Obrázok 4.4-1Jednopólový istič nn 30
Obrázok 4.4-2 Vznik elektrodynamickej sily pri rozopínaní kontaktov 31
Obrázok 4.4-3 Priebeh prúdu a napätia na kontaktoch obmedzovacieho ističa[5] 32
Obrázok 5.1-1 Test ističa nn pri 50V 35
Obrázok 5.1-2Zapálenie elektrického oblúka v čase t_1=2,09 ms 35
Obrázok 5.1-3Elektrický oblúk v čase t_{ua50}= 2,19ms 36
Obrázok 5.1-4Elektrický oblúk v čase t_2= 2,44ms 36
Obrázok 5.1-5Elektrický oblúk v čase t_3= 2,79ms 36
Obrázok 5.1-6Elektrický oblúk v čase t_4= 3,19ms 36
Obrázok 5.2-1 Test ističa nn pri 100V 37
Obrázok 5.2-2Zapálenie elektrického oblúka v čase t_1=1,55ms 37
Obrázok 5.2-3Elektrický oblúk v čase t_{ua100}= 1,6ms 38
Obrázok 5.2-4Elektrický oblúk v čase t_2= 1,8ms 38
Obrázok 5.2-5Elektrický oblúk v čase t_3= 2,34ms 38
Obrázok 5.2-6Elektrický oblúk v čase t_4= 2,54ms 38
Obrázok 5.3-1 Test ističa nn pri 150V 39
Obrázok 5.3-2Zapálenie elektrického oblúka v čase t_1=0,97ms 39
Obrázok 5.3-3Elektrický oblúk v čase t_2= 1,57ms 40
Obrázok 5.3-4Elektrický oblúk v čase t= 1,67ms 40
Obrázok 5.3-5Elektrický oblúk v čase t_3= 2,21ms 40
Obrázok 5.3-6Elektrický oblúk v čase t_4= 2,4ms 40
Obrázok 6.5-1Určenie dráhy pohyblivého kontaktu v daný okamžik 44
Obrázok 6.5-2Kontakt v pohybe ,10B, I=1035A 44
Obrázok 6.5-3Kontakt v konečnej polohe ,10B, I=1035A 44

Obrázok 6.5-4Určenie dĺžky elektrického oblúka v počiatku oddiaľovania pohyblivého kontaktu *45*

Obrázok 6.5-5Určenie dĺžky elektrického oblúka na konci oddiaľovania pohyblivého kontaktu .. *45*

Obrázok 7.1-1Dráha kontaktu pri ističi 2B *46*

Obrázok 7.1-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 2B *47*

Obrázok 7.2-1Dráha kontaktu pri ističi 10B *48*

Obrázok 7.2-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 2B *49*

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 2.1-1Parametre kamery Photron Fastcam SA-2X *15*

Tab. 7.1-1Dráha kontaktu pri ističi 2B *46*

Tab. 7.1-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 10B *47*

Tab. 7.2-1Dráha kontaktu pri ističi 10B *48*

Tab. 7.2-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 2B *49*

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor- technológia výroby logických obvodov	
ISO	Citlivosť snímača	
SD	Secure Digital- pamäťová karta	
AC	Alternating current- striedavé napätie	
DC	Direct current- jednosmerné napätie	
m	Hmotnosť	kg
S	Zdanlivý výkon	VA
U_n	Menovité elektrické napätie	V
n_n	Menovité otáčky	$ot.min^{-1}$
Ik	Skratový prúd	A
P	Činný výkon	W
u_k	Napätie na krátko	%
vn	Vysoké napätie	
nn	Nízke napätie	
F	Sila	N
i	Okamžitá hodnota prúdu	A
L	Indukčnosť	H
x	Vzdialenosť	m
n	Počet prvkov	
F_k	Prítlačná sila kontaktov	N
d	Priemer styčnej plochy kontaktov	m
E	Elektrická pevnosť	$V.m^{-1}$
u_{zn}	Zotavené napätie	V
u_a, Ua	Oblúkové napätie	V
t	Čas	s
F_D	Elektrodynamická sila pôsobiaca na elektrický oblúk	N
U	Elektrické napätie	V
I	Elektrický prúd	A
t_k	Celkový čas pohybu pohyblivého kontaktu	s

I_{MAX}	Vypínací prúd	A
s	Dráha pohyblivého kontaktu	m
v	Stredná rýchlosť pohyblivého kontaktu	$m.s^{-1}$
s_c	Celková dráha pohyblivého kontaktu	m
t_0	Čas prvotného oddialenia kontaktu	s
t_h	Čas kedy elektrický oblúk posledný krát horel medzi pohybujúcim kontaktom a vodiacou stenou	s

1 ÚVOD

Nízkonapäťové spínacie prvky sú najpoužívanejšie spínacie zariadenia, s ktorými sa bežný človek ako laik môže stretnúť. Najdôležitejším nízkonapäťovým spínacím zariadením považujem istič. Hlavná funkcia ističa je prerušiť nadprúdy a skraty, ktoré vznikajú vplyvom poruchy. V prípade, že by sa v obvode nenachádzal žiadny ochranný prvok, vznikla by porucha, hrozil by dotyk so živými časťami obvodu, znehodnotenie izolácie vedenia a znehodnotenie pripojeného zariadenia. Keďže istič slúži aj ako ochrana pred vznikom úrazu elektrickým prúdom, je veľmi dôležitá jeho spoľahlivá a účinná činnosť v prípade vzniku poruchy na elektrickom zariadení. Preto je nutné meraním pozorovať rôzne prevedenia ističov, vyhodnotiť ich spoľahlivosť a správnu funkčnosť. V mojej práci sa venujem pozorovaniu kontaktov ističa pri vypínaní vypínacieho prúdu. Rovnako som pozoroval elektrický oblúk, ktorý sa zapáli na kontaktoch pri ich oddialení a vyhodnocoval jeho oblúkové napätie a dĺžku, pokiaľ elektrický oblúk horel medzi vodiacou stenou a pohyblivým kontaktom. Meranie som vykonával v laboratóriu spínacích prístrojov pomocou vysokorýchlostnej kamery Photron SA-X2 a osciloskopu.

2 VYSOKORÝCHLOSTNÁ KAMERA

Vysokorýchlostná kamera je zariadenie, ktoré zaznamenáva videozáznam vysokou snímacou frekvenciou. Snímacia frekvencia má v praxi význam počtu snímkou vyhotovených za jednu sekundu. Čím je táto frekvencia väčšia, tým je kamera schopnejšia zaznamenávať deje, ktoré trvajú krátke časové obdobie. Aby bola kamera schopná zaznamenávať tieto deje vysokou snímacou frekvenciou, je potrebné, aby všetky jej súčasti pracovali dostatočnou frekvenciou od snímača, prevodníka až po záznamovú časť. Na meracie účely použijem vysokorýchlostnú kameru Photron Fastcam SA-X2.

2.1 Vysokorýchlostná kamera Photron Fastcam SA-X2

Kamera je vybavená CMOS senzorom o citlivosti ISO 25 000 pre monochromatický snímač, uzávierkou s rýchlosťou uzávierky od 1ms do 1μs. Na kameru je možné nasadiť objektívy s bajonetom typu Nikon F-mount, ktorý je kompatibilný s Nikon G- Mount. Na objektívy s bajonetom typu C-mount je nutné použiť adaptér. Obsahuje dva sloty pre SD karty, ktorých záznamová pamäť môže byť až 64GB, na ktorú je možné pri maximálnom rozlíšení zaznamenať až 43 684 snímok. Týmto je kamera použiteľná aj bez PC. Je vybavená dual Gigabit Ethernet portom, ktorý zabezpečuje dostatočne rýchlu komunikáciu. Umožňuje nastaviť oneskorenie od spúšte. Umožňuje ukladať na záznamové médium snímky vo formátoch JPEG, AVI, TIFF, BMP, RAW, RAWW, MRAW, PNG, MOW, FTIF. Snímky môžu obsahovať komentár (čas vyhotovenia, rozlíšenie...). Pracovná teplota kamery je od 0- 40°C . Jej váha je takmer 10 kg, závisí od použitého krytu. V mojom prípade je kamera v kovom kryte, ktorý zabraňuje vniknutiu prachu k elektronike kamery [1].

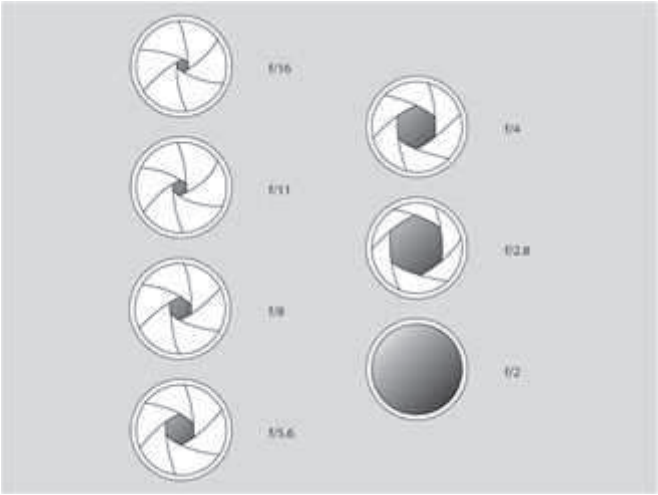
Tab. 2.1-1Parametre kamery Photron Fastcam SA-2X

Snímacia frekvencia [fps]	Rozlíšenie	
	Horizontálne	Vertikálne
1 000	1 024	1 024
2 000	1 024	1 024
5 000	1 024	1 024
10 000	1 024	1 024
12 500	1 024	1 024
13 500	1 024	1 024
18 000	896	848
22 500	768	768
40 000	640	488
45 000	512	512
50 000	640	384
75 000	512	296
100 000	384	264
200 000	256	152
400 000	256	48
480 000	384	24
720 000	256	8
900 000	128	8
1 000 000	128	8

Z Tab2.1-1 je jasné, že s vyššou snímacou frekvenciou sa rozlíšenie vyhotovenej snímky zmenšuje. Preto je vhodné zvoliť najoptimálnejšie nastavenie snímacej frekvencie.

2.1.1 Clona

Clona je zariadenie, ktoré reguluje množstvo svetla, ktoré dopadne na senzor nastavením premenného priemeru kruhového otvoru. Veľkosťou tohto otvoru ovplyvňujeme jas snímku a hĺbku ostrosti. Čim je hĺbka ostrosti väčšia, tým je celý snímaný objekt aj s pozadím ostrejší [2].



Obrázok 2.1-1Veľkosť clony a otvoru clony[2]

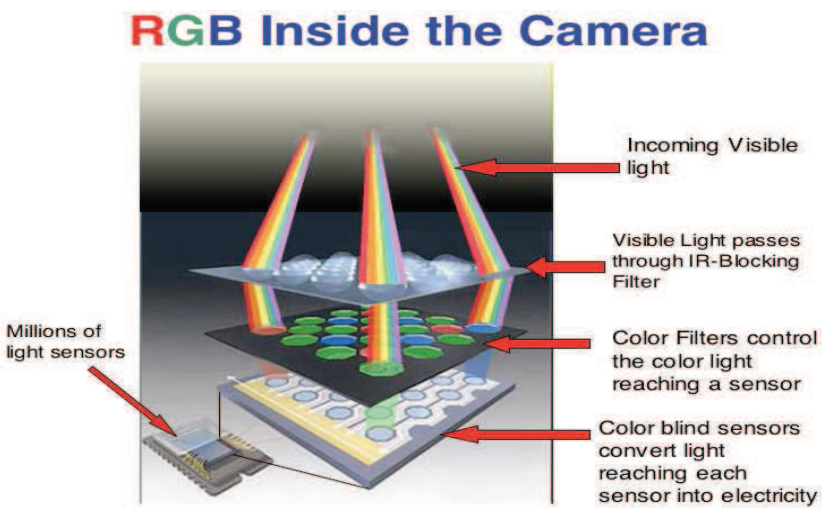
S rastúcim clonovým číslom klesá priemer otvoru clony. Ak je clonové číslo veľké, na senzor prenikne menej svetla a snímka bude tmavšia, ak clonové číslo bude malé. Na senzor prenikne väčšie množstvo svetla a snímka bude jasnejšia. Podobné je to s hĺbkou ostrosti.

2.1.2 Rýchlosť uzávierky

Rýchlosťou uzávierky nastavujeme čas počas, ktorého bude clona otvorená na nastavené clonové číslo. Po uplynutí tohto času sa clona zatvorí. Ak je rýchlosť uzávierky veľká, tak čas, počas ktorého bude dopadať svetlo na senzor bude malý. Výsledný snímok bude tmavší, pretože na senzor za krátky čas dopadlo málo svetla. Naopak pri malej rýchlosti sa clona uzatvorí za dlhší čas, na senzor dopadá svetlo dlhšiu dobu. Snímka bude svetlejšia. Veľké rýchlosti uzávierky sa používajú pri rýchlo sa pohybujúcich objektoch, aby sme zabránili ich rozmazaniu na výslednej snímke. Pri malej rýchlosti uzávierky by z rýchlo pohybujúcich sa objektov vznikla na výslednej snímke iba šmuha, čo sa niekedy využíva ako efekt.

2.1.3 Snímací čip CMOS

CMOS senzor je senzor citlivý na dopadajúce svetlo ktoré prevádza na elektrický náboj, ktorý je zosílený a ďalej spracovaný. Skladá sa zo šošoviek, farebného filtra a svetlo-citlivých senzorov väčšinou vo forme fotodiód. Šošovky usmerňujú svetlo priamo na fotodiódy, ktoré sú schopné rozlíšiť iba intenzitu svetla. Aby sme zistili farbu svetla, je medzi fotodiódou a šošovkou umiestnený farebný filter, ktorý prepustí iba jednu vlnovú dĺžku svetla, teda farbu svetla, ktorá dopadne na fotodiódu. Veľkou výhodou CMOS senzorov je možnosť snímať určitým výrezom z celkovej plochy čipu. Túto vlastnosť využívame pri snímaní vysokými rýchlosťami, kedy produkujeme veľké množstvo dát [3].



Obrázok 2.1-2CMOS senzor[3]

2.1.4 Nastavenie kamery Photron Fastcam SA-2X

Nastavenie kamery budeme prispôsobovať objektu ktorý snímame. Objektom budú kontakty ističa, ktoré sa pri zapôsobení skratovej spúšte budú od seba vzďaľovať. Tento dej bude sprevádzaný elektrickým oblúkom. Keďže jas oblúka je značný a rýchlosť oddialenia kontaktov veľká, je nutné zvoliť dostatočnú snímaciu frekvenciu, veľkosť clony, čas uzávierky a to tak, aby snímaný objekt nebol príliš tmavý ani svetlý. Za normálnych okolností by oblúk presvetlil snímaný objekt a preto použijeme na nasvietenie laser a filter, ktore umiestníme na objektív, ktorý nám prepustí len úzku časť spektra oblúka a spektrum lasera, tak aby sme na snímkach mohli pozorovať kontaktný systém.

3 LABORATÓRIUM VYSOKÝCH PRÚDOV A NAPÄTÍ

Laboratórium je rozdelené na dve časti a to na časť laboratória spínacích prístrojov a časť laboratória veľmi vysokých napätí. Moja práca je vykonávaná v laboratóriu spínacích prístrojov, ktoré podrobnejšie rozoberiem. Laboratórium slúži ako na vedecké účely, tak aj pre priemyselný sektor.

3.1 Laboratórium spínacích prístrojov

V laboratóriu sa vykonávajú skratové skúšky elektrických strojov a prístrojov.

Parametre laboratória:

- AC 50/60Hz:
  - 150 kA / 250 V – 200ms
  - 100 kA / 500 V – 200ms
  - 60 kA / 750 V – 200ms
  - 40 kA / 1000 V – 200ms
  - 40 kA / 100 V – 300ms

- DC pre 200ms

- 50 kA / 1000 V

Laboratórium je vybavené :

- Digitálnym meracím systémom na báze PXI
- Osciloskopom pre sledovanie veľmi rýchlych javov
- Vysokorýchlostnou kamerou Photron Fastcam SA-X2
- Meracím vybavením určeným na meranie dynamického namáhania do 10MPa

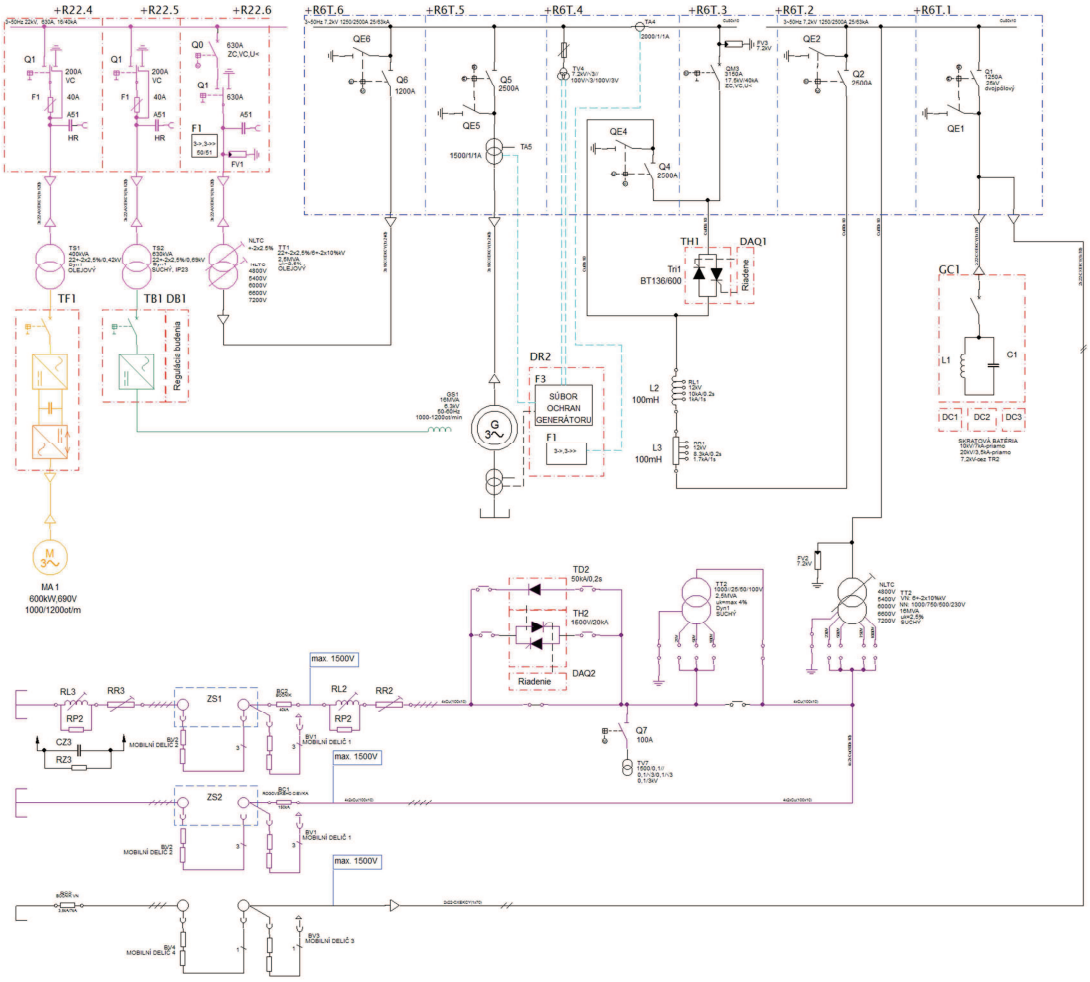
Testy, ktoré je možné vykonávať v laboratóriu:

- Výkonové testy:
  - Poistiek
  - LV MCCB ističov
- Skúšky výdržným prúdom:
  - Krytov
  - Prúdovodných častí
  - Cievok a reaktorov
  - Testy cyklické
- Pokročilé testy:
  - Generátorom silného magnetického poľa
  - Špeciálnou magnetizáciou
  - Test rázovými vlnami
  - Test cryogenických supravodivých zariadení
  - Test pre jednopólové 6 kV ističe

Prúdové zdroje:

- Generátor 16 MVA
- Transformátor 2,5 MVA
- Kapacitný 3200 μF / 10 kV

3.2 Schéma laboratória spínacích prístrojov



Obrázok 3.2-1Jednopólová schéma laboratória spínacích prístrojov

3.2.1 Prípojnicový systém číslo 1

Prípojnicový systém číslo 1 je tvorený trojfázovými prípojnicami, ktoré sú dimenzované nasledovne: 3~50 Hz; 22 kV; 630 A; 16/40 kA. Prívod elektrickej energie do prípojnic je realizovaný z rozvodne Medlánky E.ON káblovým vedením až po priechodku laboratória. Prípojnicový systém číslo 1 napája v laboratóriu spínacích prístrojov tieto rozvádzače: +R22.4, +R22.5, +R22.6.

3.2.1.1 Rozvádzač +R22.4

Rozvádzač napája transformátor TS2, ktorého výkon je 630 kVA. Ten transformuje napätie 22/0,69 kV. TS2 napája frekvenčný menič TF1, ktorý slúži na reguláciu otáčok asynchrónneho motora. Asynchrónny motor slúži ako pohon pre synchrónny generátor. Výkon asynchrónneho motora je 600kW s menovitými otáčkami 1000/1200 ot.min^{-1}.

3.2.1.2 Rozvádzač +R22.5

Rozvádzač napája transformátor TS3, ktorého výkon je 630 kVA. Ten transformuje napätie 22/0,8 kV. TS3 napája spínaný usmerňovač, ktorým regulujeme veľkosť prúdu v budeniu synchrónneho generátora.

3.2.1.3 Rozvádzač +R22.6

Rozvádzač napája transformátor TT1, ktorého výkon je 2,5 MVA a ktorý transformuje napätie 22//7,2/6,6/6/5,4/4,8 kV. TT1 môže slúžiť ako zdroj elektrickej energie pre prípojnicový systém číslo 2. Druhý použiteľný zdroj elektrickej energie je synchrónny generátor motogenerátor 6 kV.

3.2.2 Prípojnicový systém číslo 2

Prípojnicový systém číslo 2 je tvorený trojfázovými prípojnicami, ktoré sú dimenzované nasledovne: 3~50 Hz; 7,2 kV; 1250/2500 A; 25/63 kA. Prívod elektrickej energie do prípojnic je realizovaný buď transformátorom TT1, alebo synchrónnym generátorom GS1 káblovým vedením. Prípojnicový systém číslo 2 napája v laboratóriu spínacích prístrojov tieto rozvádzače: +R6T.6, +R6T.5, +R6T.4, +R6T.3.

3.2.2.1 Rozvádzač +R6T.6

Slúži na pripojenie káblového prívodu k prípojnicovému systému číslo 2 vedeného z transformátora TT1.

3.2.2.2 Rozvádzač +R6T.5

Slúži na pripojenie káblového prívodu k prípojnicovému systému číslo 2 vedeného zo synchrónneho generátoru GS1 a na meranie prúdu, ktorý dodáva GS1. Merací člen slúži ako senzor prúdu, ktorý zaznamená abnormálne hodnoty prúdu a dáva podnet ochranám v prípade vzniku poruchy.

3.2.2.3 Rozvádzač +R6T.4

Slúži ako merací člen, v ktorom sa nachádzajú prístrojové transformátory napätia a prúdu s prevodom na 7,2 kV/100 V a 2000 A/1 A. Napájajú ochrany, ktoré vyhodnocujú poruchu v tomto prípojnicovom systéme. Ďalej sa v ňom nachádza by-pas, ktorým v prípade potreby vykonávania skúšky pod napätím na prístroji (zapnutie pod napätím) preskratujeme TH1.

3.2.2.4 Rozvádzač +R6T.3

Slúži na napájanie odporníkov RR1 a reaktorov RL1, ktorých hodnotu si môžeme voliť. Ďalej slúži na napájanie prípojnicového systému číslo 3. Odporníky, reaktory a prípojnicový systém číslo 3 je možné napájať buď priamou cestou na GS1, alebo cez tyristory TH1, ktoré sú riadené. Slúžia na nastavenie presného uhla zopnutia.

3.2.3 Prípojnicový systém číslo 3

Prípojnicový systém číslo 3 je tvorený trojfázovými prípojnicami, ktoré sú dimenzované nasledovne: 3~50 Hz; 7,2 kV; 1250/2500 A; 25/63 kA. Prívod elektrickej energie do prípojnic je realizovaný za odporníkom a reaktorom, ktorý je napájaný z rozvádzača +R6T.3. Prípojnicový systém číslo 3 napája v laboratóriu spínacích prístrojov tieto rozvádzače: +R6T.2, +R6T.1.

3.2.3.1 Rozvádzač +R6T.2

Slúži aj ako prívod elektrickej energie do prípojnicového systému číslo 3 a aj ako vývod, ktorý napája transformátor s odbočkami TT2 s výkonom 16MVA. Transformátor TT2 dokáže transformovať napätie z 7,2/6,6/6/5,4/4,8 kV//1000/750/500/250V. V prípade potreby nižšieho napätia ako 250V, sa na odbočke nachádza aj transformátor TT3 s výkonom 2,5MVA, ktorý dokážeme pripojiť do série s TT2. TT3 dokáže transformovať napätie z 1000V//100/50/25V.

Do série s odbočkou je možné pripojiť aj tyristory alebo polovodičové diódy. TH2 je potrebné na získanie presného uhla skratového prúdu (uhla zapnutia) a TD2 na usmernenie striedavého prúdu pomocou polovodičových diód. Do série k odbočke sú pripojené regulovateľné odporníky RR2 a reaktory RL2, ktorými dolaďujeme požiadavky na simuláciu danej siete, v ktorej bude prístroj alebo zariadenie používané. Za nimi v sérii je pripojený bočník a za ním v sérii skratová stolica ZS1, na ktorú je pripojený skúšaný prístroj alebo zariadenie. Niekedy je potrebné simulovať sieť za prístrojom alebo zariadením a preto je taktiež možné nastavovať parametre siete regulovateľnými odporníkmi RR3 a reaktormi RL3. Dosahujúce napätie je maximálne 1000 V.

Druhá odbočka vedie priamo z vybranej odbočky TT2 na bočník a na skratovú stolicu ZS2 . Túto skratovú stolicu použijeme v prípade, že parametre siete, ktoré sme nastavovali RL1 a RR1 sú dostačujúce. Dosahujúce napätie je maximálne 1000 V.

3.2.3.2 Rozvádzač +R6T.1

Slúži ako priamy prívod z GS1 alebo TT1 bez transformácie napätia na napájanie skratovej batérie, ktorú po nabití vybíjame do skúšaného prístroja a testujeme skratovú odolnosť. Dosahované napätie je 10-20 kV.

3.3 Technické zariadenia laboratória spínacích prístrojov

3.3.1 Motogenerátor 6kV

Motogenerátor je synchrónny generátor:

- m= 50 ton
- S= 16 MVA
- U_n= 6,3 kV
- n_n= 1000-1200 ot.min^{-1}
- Ik= 13 kA/0,2 s

Poháňa ho asynchrónny motor :

- P= 600 kW
- n_n= 1000-1200 ot.min^{-1}
- U_n= 690V

Je nutné celé zariadenie počas prevádzky chladiť a neustále olejom mazať ložiská.

3.3.2 Transformátory TT1 a TT2

TT1 a TT2 sú transformátory s nízkou impedanciou, čo zabezpečuje malý úbytok napätia na pozdĺžnej impedancii transformátoru.

Parametre TT2:

- S= 16 MVA
- 6+2x10% kV / 1000-750-500-250 V
- u_k= 2,5%
- Suchý

Parametre TT1:

- S= 2,5 MVA
- 22 kV / 6+2x10%
- u_k= 2,5%
- Olejový

3.3.3 Ďalšie technické zariadenia

Tyristorové spínače:

- vn : 7,56 kV; 13 kA
- nn: 1000 V; 20 kA

Nastaviteľné reaktory a odporníky:

- 3x vn reaktory 19,5 kA/ 0,2s; 12kV 9,55mH
- 3x vn odporníky 6kV; 1,5Ω +- 5%
- 6x nn reaktory
- 6x nn odporníky

Diódový usmerňovač:

- 1500 V; 50kA

Výkonový vypínač:

- 17,5 kV; 40kA

Laboratórium spínacích prístrojov je ďalej vybavené velínom, ktorý je kompletne odstienený od vonkajších vplyvov, aby sa čo najviac zamedzilo chybám a nepresnostiam merania. Je schopné za hodinu vytvoriť 12 skratov o dĺžke 200ms osem krát denne a 200 dní v roku.

4 PRINCÍP ZHÁŠANIA SPÍNACIEHO OBLÚKU V NN SPÍNACÍCH PRÍSTROJOCH

Zhášanie oblúka je zložitý proces, keďže oblúk je vysoko energetická hmota (plazma). Na zhášanie oblúka využívame jeho vlastnosti a vlastnosti elektrického prúdu, ktorý tečie oblúkom.

4.1 Silové účinky elektrického prúdu

Ak prechádza prúdovou dráhou elektrický prúd, vzniká sila, ktorá je vyvolaná pôsobením magnetických polí. Sila vzniká pri viacerých prúdových dráhach, pri deformácií, či zakrivení prúdovej dráhy, alebo ak sa prúdová dráha nachádza v blízkosti feromagnetického rozhrania. Pre zhášanie oblúka v nn spínacích prístrojoch sa najčastejšie používa princíp magnetických vypínačov, ktorých jedna zo základných častí je zhášacia komora z feromagnetického materiálu [4].

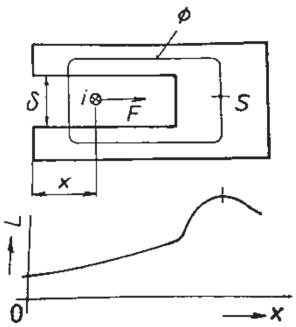
Ak sa nachádza vodič, ktorým prechádza elektrický prúd v blízkosti feromagnetického materiálu, tak vplyvom elektromagnetickej indukcie sa indukuje prúd do feromagnetického materiálu, ktorý má ten istý smer. Túto situáciu môžeme považovať za prípad dvoch rovnobežných, nekonečne dlhých vodičov [4].

Za konečnú dĺžku feromagnetického materiálu v smere prúdu môžeme považovať rozhranie zhášacej komory, ktorá je najčastejšie vyrobená z oceľových plechov. Veľkosť sily vťahujúcej oblúk do vnútra výrezu zhášacej komory sa stanovuje zo zmeny nahromadenej energie v magnetickom poli oblúku [4].

Určuje ju rovnica, ktorá vyjadruje indukčnosť obvodu a prúd, ktorý ním prechádza a ktorý sa nebude meniť v závislosti od súradnice *x* [4].

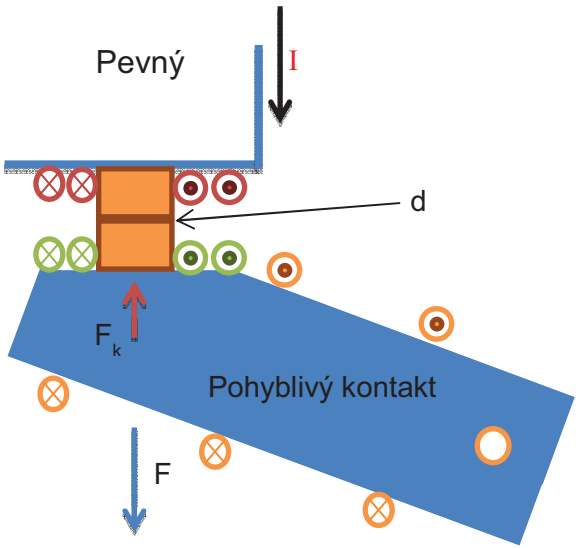
$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x} \qquad \text{(N; A, H, m)} \qquad (4.1\text{-}1)$$

Zo závislosti *L=f(x)* je zrejmé, že pri pohybu oblúku v ose štrbiny indukčnosť rastie až do bodu S. Ak pohyb pokračuje aj za bod S, indukčnosť klesá. Silu, ktorá pôsobí na časť prúdovej dráhy (oblúk) sa *n* krát zväčší, ak oblúk bude prechádzať štrbinami *n* plechov [4].



Obrázok 4.1-1 Sila vťahujúca oblúk do oceľovej štrbiny komory [4]

4.1.1 Odpudivá sila medzi kontaktmi



Obrázok 4.1-2Odpudivá sila medzi kontaktmi

Pri kontaktoch s bodovým stykom je možné počítať odpudivú silu, pričom berieme do úvahy kruhovú styčnú plochu s priemerom d. Pri kontaktoch z toho istého materiálu a uvažovaní pružnej deformácií je možné vypočítať priemer d [4].

$$F = i^2 ln\frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \qquad (\mathrm{N;\ A^2,\ m,\ m^{-1}}) \qquad (4.1\text{-}2)$$

Pre harmonický priebeh kde $i = I_m \sin \omega t$

$$F = (i \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t)^2 \cdot ln\frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \qquad (\mathrm{N;\ A,\ rad.s^{-1},\ s,\ m,\ m^{-1}}) \qquad (4.1\text{-}3)$$

$$F = i^2(1 - \cos 2\omega t) \cdot ln\frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \qquad (\mathrm{N;\ A^2,\ rad.s^{-1},\ s,\ m,\ m^{-1}}) \qquad (4.1\text{-}4)$$

Z obrázku je zrejmé, že prechodom elektrického prúdu cez pevný kontakt a pohyblivý kontakt (vodič) vzniká magnetické pole. Jeho smer je na obrázku vyznačený z hľadiska smeru pretekajúceho prúdu. Nanesený styčný materiál na pevný kontakt a pohyblivý kontakt spôsobuje zúženie prierezu vodiča, ktorým prúd prechádza. Týmto vzniká priestor, kde sa nahromadí súhlasné magnetické pole. Súhlasné magnetické polia sa odpudzujú a preto vzniká sila F, ktorá pôsobí proti prítlačnej sile kontaktov F_K. Veľkosť sily F je závislá na veľkosti prechádzajúceho prúdu. V prípade, kedy prechádza ističom vypínací prúd, dochádza k vybaveniu vypínacieho mechanizmu a tým sa sila F_K zmenšuje, pričom sila F je dostatočne veľká na to, aby pohyblivý kontakt urýchlila. Tento princíp sa využíva napríklad pri stavbe ističov.

4.2 Zánik elektrického oblúku

Podmienkou pre uhasenie elektrického oblúku je prevaha deionizačných procesov nad ionizačnými. Medzi hlavné deionizačné procesy patrí difúzia častíc z teplých oblastí z okolia osy plazmy do okrajových oblastí s nižšou teplotou. Ďalší deionizačný proces podporujúci zánik elektrického oblúka je rekombinácia, kedy kladný iont a záporný elektrón sa pri nej spojí a vznikne neutrálny atóm. Uvoľní sa energia spotrebovaná na ionizáciu. Rekombinácia môže nastať na elektróde, v priestore vyplnenom plazmou alebo na okraji plazmy, kde okraj je tvorený napríklad pevnou stenou. Ak nie je v okolí pri rekombinácii žiadna tretia častica. ktorá by mohla uvoľnenú energiu prevziať, tak sa energia vyžiari vo forme svetla. Ak nastane rekombinácia v blízkom okolí elektródy, uvoľnená energia sa premení na teplo, ktoré zahrieva elektródy [4].

Radiálna difúzia častíc je difúzia v smere polomeru plazmy. Prebieha v oblúku spontánne. Na podporu tohto procesu je nutné vybrať vhodné zhášadlo, ktoré bude podporovať ochladzovanie oblúka. Pri ochladzovaní povrchu elektrického oblúka sa zmenšuje jeho polomer. Prúd prechádza oblúkom s menším polomerom. Zväčší sa prúdová hustota a zväčší sa odpor plazmy. Joulové teplo uvoľnené z oblúka sa zväčší a tým sa zväčší aj teplo oblúka. Pri vyššej teplote elektrického oblúka sa zväčší energia medzi oblúkom a okolím. Ak je chladiace médium schopné odviesť vzniknuté teplo pri celom procese, ktorý sa opakuje, oblúk zanikne [4].

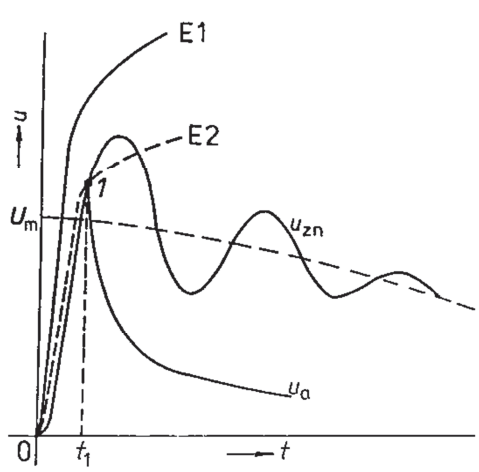
Účinnosť ochladzovania povrchu oblúka je možné zväčšiť vzájomným pohybom chladiaceho média a zhášaného oblúku. Väčšina nn prístrojov sú prístroje s vlastnou energiou a pohyb sa vykonáva za pomoci magnetického poľa, ktoré je vybudené vypínaným prúdom [4].

4.3 Princíp zhášania striedavého oblúka

Pri zhášaní elektrického oblúka pri striedavého prúde vychádzame zo skutočnosti, že striedavý prúd prechádza nulou, kedy oblúk uhasína. Teoreticky by bolo možné rozpojiť kontakty spínača bez sprevádzania elektrickým oblúkom, ak by sa kontakty rozopli v čase, kedy prúd prechádza nulou a oddiaľovali by sa dostatočne rýchlo, aby vplyvom zotavujúceho napätia nedošlo k vzniku elektrického oblúku [4].

Zotavené napätie je napätie, ktoré sa objaví na kontaktoch po uhasnutí oblúka a doznie do obnoveného napätia, čo je napätie zdroja [4].

Úspešné zahasenie striedavého oblúka je podmienené rýchlejším nárastom elektrickej pevnosti ako rýchlosť nárastu zotaveného napätia. Pri striedavých prúdoch nie je dôležitý zánik elektrického oblúka, keďže prúd prechádza nulou, ale je dôležité zabrániť vhodným spôsobom zhášania a vhodným zhášadlom opätovnému zapáleniu oblúka [4].



Obrázok 4.3-1Podmienky úspešného uhasnutia oblúka [4]

Z obrázka 4.3-1 môžeme pozorovať nárast elektrickej pevnosti na krivkách *E1* a *E2,* kedy krivka *E1* charakterizuje rýchlejší nárast elektrickej pevnosti ako nárast zotaveného napätia u_{zn}. *E2* charakterizuje pomalší nárast elektrickej pevnosti ako zotaveného napätia u_{zn} a v čase t1 dochádza k prevahe ionizačných procesov nad deionizačnými. Dôjde k znovu zapáleniu elektrického oblúka a na kontaktoch sa objaví oblúkové napätie u_a. Pre úspešné vypnutie elektrického obvodu a tým aj uhasenie vzniknutého elektrického oblúka je nutné, aby celková energia odvedená z plazy bola väčšia, ako energia privedená do plazmy [4].

4.3.1 Princíp zhášania striedavého elektrického oblúka pri magnetických zhášadlách

Sú to zhášadlá, kedy je zhášacie médium v okolí kontaktov a nepôsobí priamo na elektrický oblúk. Pôsobením magnetickým poľom na oblúk je vzniknutou silou vháňaný z priestoru kontaktov do zhášacej komory. Pri týchto zhášadlách v oblasti nuly prúdu, kedy zanikne magnetické pole pôsobiace na oblúk, ktorý sa pohybuje voči zhášaciemu médiu, nastane situácia, kedy na oblúk prestane pôsobiť magnetické pole a oblúk je len v zotrvačnom pohybe voči zhášadlu. V tomto okamihu rekombinačné procesy podporujúce deionizáciu zbytkového stĺpca plazmy sú podporované len radiálnou výmenou častíc. Radiálna výmena častíc je radiálna difúzia častíc a súčasný vstup neutrálnych častíc do jadra oblúka [4].

Veľkosť elektrodynamických síl, ktoré vháňajú elektrický oblúk do zhášacej komory sú závislé na veľkosti prúdu. V oblasti veľkých prúdov je oblúk vháňaný do komory veľkou rýchlosťou, čo znamená intenzívnu radiálnu výmenu častíc a rozrušovanie elektrického oblúka. Oblúk uhasína v prvej nule prúdu. V oblasti malých prúdov rádovo jednotky až niekoľko desiatok ampérov je elektrodynamická sila pôsobiaca na elektrický oblúk relatívne malá. Oblúk horí v blízkosti kontaktov, na uhasenie oblúka taktiež postačuje radiálna výmena častíc [4].

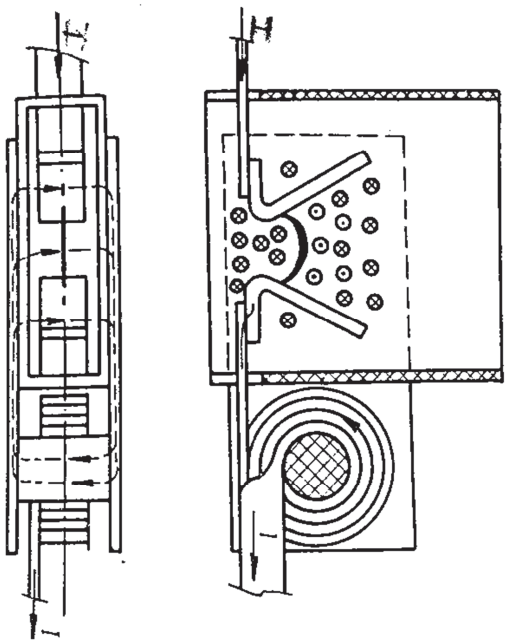
4.3.2 Magnetické vypínače

Magnetické vypínače sú vypínače s vlastnou zhášacou energiou, ktorou je magnetické pole vytvorené prúdom prerušovaného v obvode. Zhášacia účinnosť vypínača rastie s veľkosťou prerušovaného prúdu. Tento druh vypínačov vykazuje najväčšie oblúkové napätie. Príčinou je veľká dĺžka oblúku a súčasné chladenie oblúku na veľkej ploche. Tieto vypínače sú vhodné ako

pre striedavé prúdy, tak aj pre jednosmerné prúdy. Avšak pri striedavých prúdoch je rozhodujúci priebeh deionizácie oblúka pri prechode nulou, ktorá nastáva prirodzeným spôsobom [4].

Magnetické vypínače pracujú na princípe interakcie magnetického poľa oblúku s magnetickým poľom určitého úseku prúdovej dráhy, ktorý je zaradený tak, aby pri prerušení obvodu vypínačom bol oblúk vháňaný do hasiacej komory. Tento proces nazývame aj magnetické vyfukovanie oblúku. Zdrojom magnetického poľa, ktoré bude pôsobiť na oblúk, môže byť zhášacia cievka alebo prúdový záhyb [4].

Zhášacia cievka má železné jadro, na ktorom je navinutá. Železné jadro tvoria aj pólové nadstavce, ktoré obklopujú kontakty vypínača. Takto nám vznikne železné jadro so vzduchovou medzerou, cez ktorú sa uzatvára magnetický tok vytvorený od hasiacej cievky. Aby oblúk, ktorý vznikne pri vypínaní obvodu bol magneticky vyfukovaný, je potrebné aby magnetické pole bolo nad ním zoslabované a pod ním zosilňované. To docielime správnym navinutím cievky. Takto navrhnutý systém bude fungovať aj pri striedavom prúde, pri ktorom sa mení polarita prúdu [4].



Obrázok 4.3-2Magnetický vypínač[4]

Z obrázka je zrejmý popis systému vyfukovania oblúka. Na obrázku sú kontakty vyhotovené tak, že ich vzájomná vzdialenosť sa zväčšuje. Pri magnetickom vyfukovaní to ma za následok zväčšovanie dĺžky oblúka, tým aj chladiacej plochy oblúka, čo zintenzívňuje radiálnu výmenu častíc [4].

Ak horí oblúk medzi kontaktmi, ktoré sa od seba oddiaľujú pri konštantnom napätí obvodu a prúdu, oblúk vždy uhasne pri tej istej vzdialenosti kontaktov bez ohľadu na rýchlosť oddiaľovania kontaktov. Veľká rýchlosť kontaktov zaručuje dosiahnutie danej vzdialenosti za kratší čas, ktorý určuje čas, počas ktorého bude oblúk horieť [4].

Veľkosť vypínacieho prúdu nám určuje veľkosť magnetického poľa potrebného na uskutočnenie magnetického vyfukovania. Pri veľkých prúdoch je elektrodynamická sila spôsobená vzájomným pôsobením magnetických polí veľká. Veľká elektrodynamická sila spôsobí rýchlejší pohyb oblúka voči hasiacemu prostrediu, v ktorom sa nachádza. Oblúk je

rozrušovaný a nastáva intenzívna radiálna výmena častíc, ktorá má za následok vznik veľkého oblúkového napätia a oblúk uhasína. Podľa predchádzajúcej teórie môžeme povedať, že veľkosť elektrodynamickej sily pôsobiacej na elektrický oblúk bude zásadne ovplyvňovať vypínaciu schopnosť vypínača s magnetickým vyfukovaním [4].

Zhrnutím poznatkov môžeme usúdiť, že ak sa oblúk len predlžuje, tak sa nedostáva do styku s väčším počtom studených a neionizovaných častíc vzduchu. Pri zrýchlenom pohybe oblúku sa oblúk prediera prostredím (vzduchom), čím je vystavený veľkému počtu studených a neionizovaných častíc. Je to podobné, ako by sme na nehybný oblúk pôsobili prúdením hasiaceho média. Na tomto princípe fungujú tlakovzdušné vypínače [4].

Vyfukovaciu sústavu taktiež tvorí zhášacia komora na zvýšenie vypínacej schopnosti vypínača. Poznáme dva typy zhášacich komôr a to zhášacie komory izolačné a zhášacie komory kovové. Zhášacie komory izolačné sa v súčasnosti už takmer nepoužívajú a preto sa budeme venovať len kovovým zhášacím komorám [4].

4.3.3 Kovové zhášacie komory

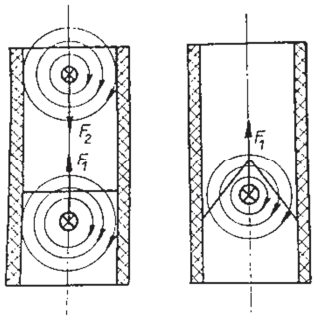
Sú zložené z izolačného obalu, v ktorom sú vložené kovové rebrá, ktoré sú naprieč k ose oblúku. Môžeme ich rozdeliť podľa hustoty rebier a to na veľmi hustý rošt, ktoré sa používali u magnetických vypínačov na vysoké napätie a komory s redším roštom, ktoré sú bežnou súčasťou magnetických vypínačov na nízke napätie [4].

Oblúk, ktorý sa zapáli je vháňaný do kovovej komory, kde sa oblúk rozdelí na niekoľko čiastkových oblúkov spojených do série. Zhášacia komora musí pritom spĺňať požiadavky a to také, aby kovový rošt nebol príliš hustý, aby aerodynamický odpor nebránil úniku oblúkových plynov z komory a takto nezabránil vniknutiu oblúku medzi rebrá roštu. Na druhej strane by mal byť dostatočné hustý, aby dokázal uhasiť oblúk. Pri nízko napäťových spínačoch (najmä u ističov) je rozsah vypínacích prúdov (6 až 100) násobok menovitého prúdu. Z toho vyplýva, že sila, ktorá pôsobí na oblúk a vháňa oblúk medzi rebrá komory musí byť dostatočné veľká aj pri malých prúdoch [4].

Komora je opotrebovaná opakovaným vypínaním veľkých prúdov. Následkom toho je materiál opaľovaný a postupne opotrebovaný. Pri striedavom prúde sa vyfukovaný oblúk natiahne medzi rebrá komory, kde jeho veľká dĺžka vytvorí veľkú chladiacu plochu a tým aj podmienky pre intenzívnu radiálnu výmenu častíc v nule prúdu. Vypínacia schopnosť komory je daná zahltením ionizovaným prostredím [4].

Dnešné magnetické vypínače, zvlášť nn ističe, používajú na dosiahnutie potrebnej veľkosti magnetického poľa prúdový záhyb v úseku kontaktov. Z toho dôvodu sa v nich nenachádza vyfukovacia cievka. Prúdová dráha tvorí účinnú slučku, ktorej magnetické pole sa niekedy zosilňuje bočnými oceľovými príložkami. Rošt komory je vyhotovený z oceľových dosiek, ktoré pomáhajú vtiahnuť oblúk do roštu [4].

Ak sa priblíži oblúk k feromagnetickému materiálu, ktorý je uložený priečne vzhľadom na os oblúka, uzatvára sa magnetický tok s feromagnetickým materiálom. Oblúk má snahu sa nachádzať v takej polohe, aby energia k vybudeniu magnetického poľa bola čo najmenšia. Táto polohanastáva vtedy, keď sa oblúk nachádza na stene feromagnetického materiálu (oceľové rebro roštu). Môžeme povedať, že vzniká sila F,1 ktorá vťahuje oblúk na oceľové rebro. Ak je oblúk vhnaný magnetickým poľom prúdového záhybu, ktoré vzniklo prechodom vypínaného prúdu do horného okraja oceľovej dosky, vzniká sila F2, ktorá bráni oblúku opustiť rošt [4].



Obrázok 4.3-3Elektrický oblúk v zhášacej komore[4]

V kovovej komore sa oblúk rozdelí na viac krátkych oblúčikov. Na každom oblúčiku vznikne asi 20 až 30V úbytku napätia. V nn spínacích prístrojov je aj tento malý úbytok napätia význačný a preto je postačujúce vytvoriť redší rošt zhášacej komory [4].

4.4 Ističe

Jedná sa o spínací prvok, ktorý samočinne vypína obvod v prípade poruchy. Poruchou myslíme vznik skratu alebo preťaženia. Tieto poruchy vedú k vzniku skratového prúdu alebo nadprúdu, ktorých hodnoty sú 6 až 100 krát väčšie ako hodnota menovitého prúdu ističa. Pri zapínaní ističa do zapnutej polohy sa napne vypínacia pružina, ktorá stále tlačí pohyblivé kontakty do vypnutej polohy. Kontakty sa udržia v zapnutej polohe pomocou vhodného zámku, ktorý sa pri poruche uvoľní a kontakty sa vracajú naspäť do vypnutej polohy napnutou vypínacou pružinou [4].

Zámok vypínača je mechanizmus, pomocou ktorého sa kontakty udržujú v zapnutej polohe proti sile vypínacej pružiny, ktorá má naopak snahu kontakty držať vo vypnutej polohe. Zámky sa vyhotovujú ako jednoduché alebo zložité. Jednoduchý zámok je tvorený buď západkou alebo prelomenými pákami. Zložené zámky sú tvorené niekoľkými jednoduchými zámkami. Takýto zámok nazývame aj ako voľnobežka. Zámok sa musí vybaviť pôsobením malej sily. Túto silu vyvolávame buď ručne pomocou páčky, ktorou zapíname a vypíname istič, skratovou spúšťou alebo spúšťou, ktorá zapôsobí pri preťažení obvodu [4].

Spúšť je tvorená prúdovou dráhou a mechanizmom. Mechanizmus sa uvádza do činnosti buď elektromagnetickým alebo tepelným pôsobením prúdu. Následne mechanizmus vybaví zámok alebo voľnobežku ističa. Spúšte sú dimenzované tak, aby zapôsobili pri určitom násobku menovitého prúdu, ktorý prechádza obvodom [4].

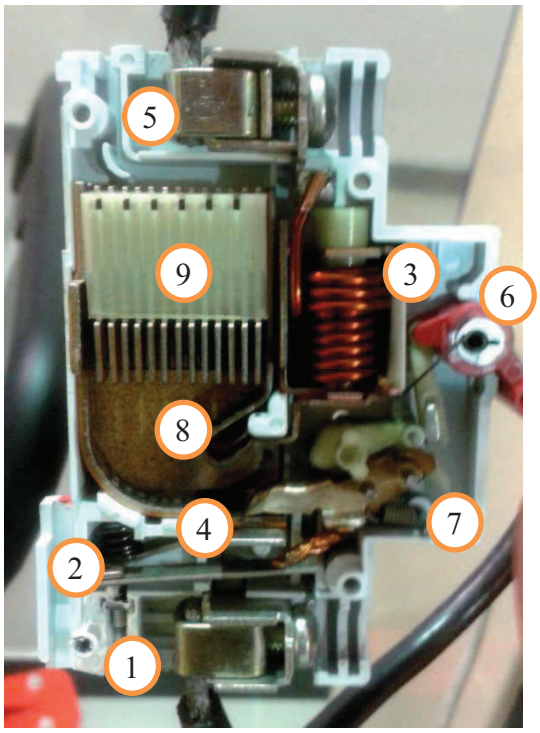
Ističe podľa veľkosti rozdeľujeme do troch kategórii:

- Malé ističe do 63 A
- Stredné ističe 100 až 630 A
- Veľké ističe 1000 A a viac

Malé ističe sa vyrábajú v jednotnej šírke a to 17,5 mm na pól. Kontakty ističov sa vyrábajú buď ako jednoduché alebo mostíkové, teda s jedným alebo dvojitým prerušením prúdovej dráhy. Kontakty sa vyrábajú prevažne ako zliatina striebra. Ističe vybavené zhášacou komoru môžu vykazovať obmedzujúci účinok. To znamená, že vypínací prúd nedosiahne svojho maxima, pretože nárast odporu oblúku je rýchlejší. Takéto ističe majú veľkú vypínaciu schopnosť. Čas, za ktorý vybaví istič pri skrate je 3 až 4 ms [4].

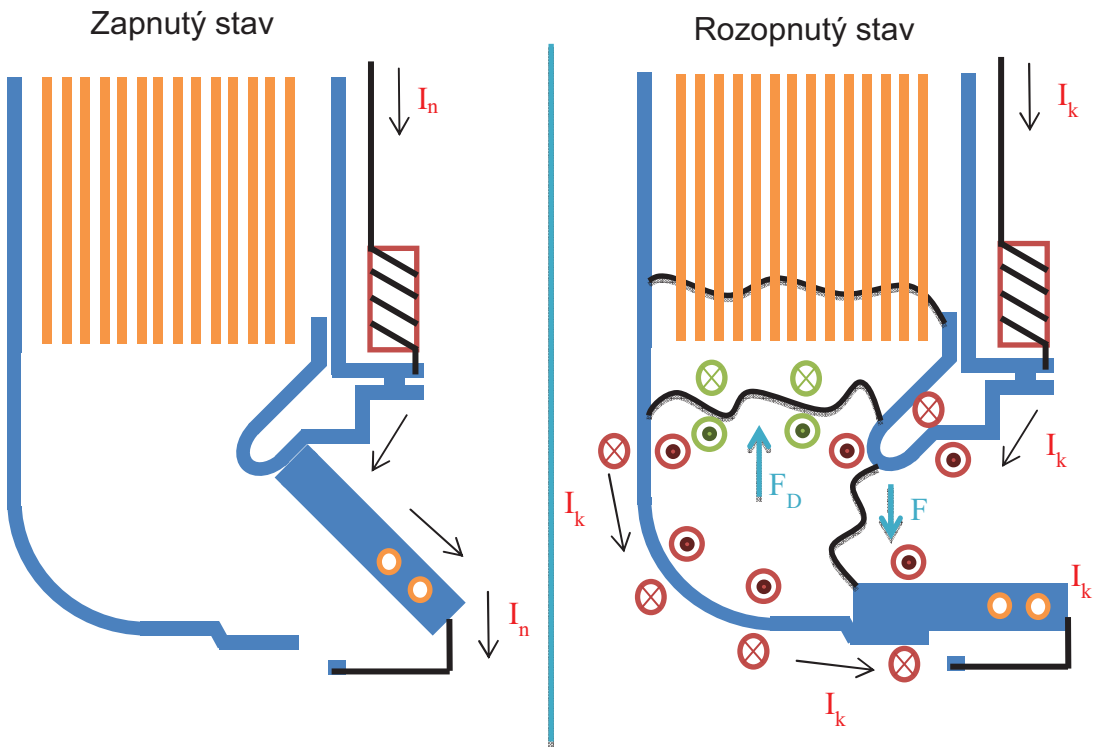
4.4.1 Modulárny nn istič

Prúdová dráha je tvorená svorkou 1, bimetalom nadprúdovej spúšte 2, jednoduchými kontaktmi 4, skratovou spúšťou 3, a svorkou 5. V prípade, že istič vybaví zapôsobením nadprúdovej spúšte eventuálne skratovej spúšte alebo obsluhou pomocou ručnej páky, tak sa prevedú kontakty do vypnutej polohy pomocou aretačného mechanizmu. Ako náhle dôjde k rozpájaniu kontaktov, elektrický oblúk sa zapáli a je vháňaný elektrodynamickými silami spôsobenými prúdovým záhybom a oceľovou zhášacou komorou do zhášacej komory, kde sa oblúk rozdelí na n oblúčikov v sérii.



1. Svorka prúdovej dráhy
2. Bimetal nadprúdovej spúšte
3. Vinutie skratovej spúšte
4. Jednoduché kontakty
5. Svorka prúdovej dráhy
6. Ručná páka
7. Aretačný mechanizmus
8. Prúdový záhyb
9. Zhášacia komora

Obrázok 4.4-1Jednopólový istič nn



Obrázok 4.4-2 Vznik elektrodynamickej sily pri rozopínaní kontaktov

Pri zapôsobení jednej zo spúšť ističa sa kontakty dostanú do pohybu. Pri rozopínaní kontaktov ističa sa zapáli elektrický oblúk. Prúd, ktorý spôsobil zapôsobenie spúšte tečie v prvej fáze cez prúdový záhyb, elektrickým oblúkom a rozopínajúci sa kontaktom. Oddiaľujúci kontakt je pri tom urýchľovaný odpudivou silou *F*, ktorú vyvolá magnetické pole, ktoré vznikne na prúdovom záhybe a na oddiaľujúcom kontakte, čo znázorňujú siločiary na obrázku. Horiaci elektrický oblúk je v tom istom okamihu vyfukovaný elektrodynamickou silou F_D do zhášacej komory. Elektromagnetickou indukciou sa uzatvorí magnetický tok v oceľovom rebre roštu zhášacej komory. Elektrický oblúk sa snaží zaujať takú polohu, pri ktorej sa spotrebuje najmenej potrebnej energie k vybudeniu magnetického poľa. To je poloha, kedy je oblúk v čo najmenšej vzdialenosti od konca zárezu v rebre. Z tohto dôvodu vzniká ďalšia sila, ktorá oblúk vťahuje do zhášacej komory a ktorá zároveň aj bráni elektrickému oblúku opustiť zhášaciu komoru. Ako náhle je elektrický oblúk v zhášacej komore, rozdelí sa na *n* oblúčikov, na ktorých vznikne úbytok napätia približne 20V spôsobeným intenzívnou radiálnou výmenou častíc. Ak je oblúkové napätie dostatočne veľké, oblúk uhasína ešte pred dosiahnutím jeho špičky. To dokazuje, že nárast deionizovaného prostredia alebo elektrickej pevnosti prostredia, v ktorej sa nachádza oblúk, bude rýchlejšia, ako nárast ionizovaného prostredia. V prípade, že by elektrická pevnosť prostredia nebola dostatočne veľká, tak vplyvom zotaveného napätia, ktoré sa objaví na kontaktoch ističa pri uhasnutí elektrického oblúka, sa zapáli ďalší elektrický oblúk.

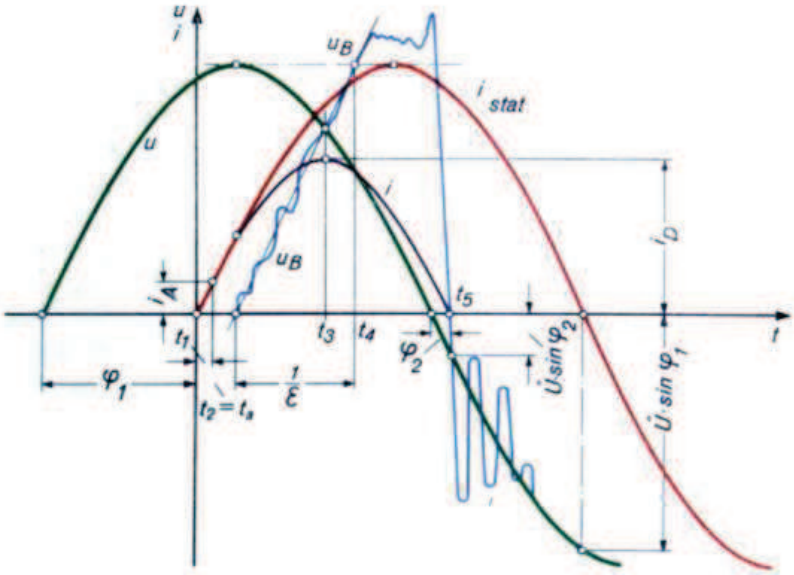
4.4.2 Kompaktný istič

Kompaktné ističe sa realizujú aj ako obmedzovacie. Tento spôsob realizácie je vhodný ako z ekonomického hľadiska, tak aj z hľadiska istenia vedenia, keďže pracujú ako obmedzovacie vypínače to jest, že istič preruší obvod ešte pred maximom prúdu. Z toho dôvodu nie je potrebné ich realizovať príliš robustné a preto aj zaberajú menší priestor. Princíp zhášania oblúka je podobný ako pri modulárnych nn ističoch.

4.4.3 Obmedzovacie ističe

Obmedzovací účinok je vlastnosť ističa, ak spĺňa tieto požiadavky:

- Oddialenie kontaktov nastane skôr ako prúd dosiahne svojho maxima
- Po oddialení kontaktov narastie oblúkové napätie (jeho odpor) na toľko, aby sa prúd obmedzil a elektrický oblúk následne uhasil



Obrázok 4.4-3 Priebeh prúdu a napätia na kontaktoch obmedzovacieho ističa[5]

V čase t1 vzniká skrat. V čase t2 zapôsobí skratová spúšť. Tento čas sa nazýva aj doba nastavenia. V čase t2' sa kontakty dajú do pohybu. Rozdielom časov t2' a t2 dostaneme čas, ktorý nazývame aj vlastná doba vypínača. Táto doba sa dá považovať za konštantnú, ktorá má hodnotu zhruba 1ms. Doba nastavenia závisí od strmosti nárastu skratového prúdu, teda od časovej konštanty vypínaného obvodu. Z priebehu je možné pozorovať, že oblúkové napätie narastá zhruba lineárne (horiaci oblúk sa predlžuje na oddiaľujúcich sa kontaktoch). V čase t3 hodnota oblúkového napätia dosahuje hodnotu napätia zdroja. Následne je vyfúknutý do zhášacej komory, kde horí. Hodnota oblúkového napätia vplyvom intenzívnej radiálnej výmene častíc narastie nad hodnotu napätia zdroja. Oblúk v čase t5 uhasína a vzniká zotavené napätie. Tento dej prebehol ešte pred nulou prúdu. Z tohto je jasné, že vypínač vykazuje obmedzovací účinok.

Aby obmedzovacie ističe obmedzovali vypínaný prúd, je potrebné, aby sa kontakty dostatočne rýchlo oddialili. Preto sú tieto kontakty urýchľované a to buď pôsobením vypínaného prúdu alebo cudzím zdrojom. Cudzím zdrojom energie rozumieme zariadenia ako odpaľovací transformátor, nárazovú kotvu alebo využívame mechanickú energia vypínacích pružín [4].

Urýchľovanie kontaktov pôsobením vypínaného prúdu docielime použitím prúdového záhybu v prúdovej dráhe ističa. Pri vzniku skratu tečie prúdovým záhybom skratový prúd ako aj pohyblivým kontaktom, ktorý prilieha na tento prúdový záhyb. Keďže tok prúdu je v prúdovom záhybe opačný ako v pohyblivom kontaktne, tak sa vzniknuté magnetické polia od seba odpudzujú. Vzniká sila, ktorá kontakty od seba odpudzuje a tým ich aj urýchľuje.

4.5 Kontaktný systém v rôznych stavoch pri nn ističoch

Kontaktný systém je systém, ktorý rozopína alebo spína obvod. Je to jedna zo základných častí pri nn ističoch. Kontakty v tomto spínacom prístroji majú za úlohu dokázať viesť menovité prúdy, nadprúdy a skraty počas krátkeho časového obdobia.

4.5.1 Kontaktný systém v zapnutom stave

Kontaktný systém v zapnutom stave držíme pomocou zámkov alebo voľnobežiek, ktoré pôsobia proti vypínacej pružine.

Kontakty musia mať dostatočný styk v zapnutom stave, aby stykový odpor kontaktov bol čo najmenší. Tým, že stykový odpor kontaktov bude malý, tak prechodom prúdu sa miesto styku nebude výrazne zahrievať a nedôjde k zvareniu kontaktov a tým aj k jeho disfunkcii. Styčné plochy kontaktov musia byť vyrobené z vhodného materiálu. Vhodným materiálom rozumieme najmä materiál s malý elektrický odporom, veľkou odolnosťou proti opalu elektrickým oblúkom a s veľkou odolnosťou proti zvareniu kontaktov. Odolnosťou proti opalu elektrickým oblúkom rozumieme situáciu, kedy sa na oddiaľujúcich kontaktoch zapáli elektrický oblúk a následne medzi nimi aj horí. Horiaci oblúk má vysokú teplotu, ktorou natavuje materiál kontaktov. Tým, že je materiál kontaktov natavený, s pôsobením oblúka do priestoru uvoľňujú jeho mikročiastočky a splynené časti. Uvoľnené mikročiastočky a plyny zhoršujú elektrickú pevnosť prostredia a tým aj vypínaciu schopnosť vypínača. Tieto čiastočky sa môžu taktiež zachytiť v zhášacej komore ako aj na kontaktoch. Ďalšie pôsobenie oblúka na kontakty vplyvom opaľovania oblúkom je opotrebovanie kontaktov. Všetky tieto faktory nám zmenšujú životnosť vypínača. Z tohto dôvodu je nutné vybrať vhodný materiál na stykovú plochu kontaktov.

Najčastejšie používané materiály vyrobené práškovou metalurgiou na báze striebra. Prvú skupinu zastupuje materiál typu Ag- CdO. Odporúča sa na použitie pri spínačoch, ktorých spínané prúdy sú v rozmedzí 50 až 3000 A striedavého prúdu alebo pri spínačoch s veľkým spínacím prúdom pri menšom menovitom prúde. Takýto spínač je napríklad nn istič. Tento materiál má najlepšiu vypínaciu schopnosť [4].

Druhú skupinu tvorí materiál typu Ag- Ni, ktorý má dobrú odolnosť proti opalu elektrickým oblúkom. Má len o málo menšiu vypínaciu schopnosť ako materiál typu Ag- CdO. Tretiu skupinu nám tvorí materiál typu Ag- C najčastejšie 3 až 5% grafitu. Vyznačuje sa veľkou odolnosťou proti zvareniu ale pomerne malou odolnosťou proti opalu elektrickým oblúkom. Tým nám vzniká značné množstvo sadzí, ktoré sa zachytávajú na zhášaciu komoru a kontakty spínača [4].

Štvrtú skupinu zastupujú materiály na báze wolframu. Vyznačujú sa veľkou odolnosťou proti opalu elektrickým oblúkom. Odporúča sa ho používať pri spínačoch nn a vn s veľkou vypínacou schopnosťou. Nevýhodou je veľký stykový odpor wolfrámových povrchových vrstiev s veľkým odporom a veľkou mechanickou pevnosťou [4].

Dôležitým faktorom pri zapnutom stave je taktiež dostatočná prítlačná sila pôsobiaca pohyblivým kontaktom na pevný kontakt. Styk kontaktov je tvorený mikroplôškami a nie celou plochou kontaktov, nakoľko materiál, z ktorých sú vyrábané nie sú dokonalo rovné. Dostatočnou prítlačnou silou rozumieme silu, pri ktorej stykový odpor kontaktov bude čo najmenší. Avšak táto sila nemôže byť neúmerne veľká. Pri vypínaní skratového prúdu by mohlo dôjsť k zvareniu kontaktov aj napriek tomu, že stykový odpor by bol malý. Došlo by k nataveniu mikroplôšok a prítlačnou silou k zvareniu.

Stykový odpor nám tiež ovplyvňujú cudzie vrstvy na kontaktoch. Cudzími vrstvami myslíme látky, ktoré znečisťujú čistý materiál kontaktov. Často krát tieto vrstvy majú oveľa horšie elektrické a mechanické vlastnosti ako použitý pri výrobe kontaktov. Čím je táto vrstva širšia a prítlačná sila kontaktov menšia, tým je stykový odpor kontaktov väčší [4].

Pri medi sa pri teplote pod 200°C vytvárajú vrstvy Cu_2O. Šírka vrstiev sa pohybuje od 10 do 100nm.Taktiež na meď pôsobí ovzdušie, ktoré obsahuje oxid siričitý SO_2. Spolu s vodou vytvára na medi vrstvu zelenej farby medenku [4].

Pri striebre pod teplotou 180°C vzniká oxid strieborný AgO. Šírka vrstiev sa pohybuje okolo 2nm. Oxid strieborný je veľmi mäkký a nestály, pri teplote nad 180°C sa rozkladá. Dá sa povedať, že elektrickým oblúkom sa kontakty čistia od cudzích vrstiev. Tým sa udržiava malý stykový odpor. Z tohto hľadiska je striebro veľmi vhodným materiálom [4].

4.5.2 Kontaktný systém vo vypnutom stave

V okamihu, kedy je kontaktný systém vo vypnutom stave, tesne po uhasnutí elektrického oblúka, vzniká zotavené napätie. Vznikom zotaveného napätia vzniká elektrické pole. Vplyvom elektrického poľa putujú elektróny ku kladnému kontaktu a kladné ionty k zápornému kontaktu, kde rekombinujú. Rýchlosť rekombinácie nám určuje nárast elektrickej pevnosti prostredia, ako aj vypínaciu schopnosť vypínača. Nárast elektrickej pevnosti prostredia musí byť rýchlejšia ako nárast zotaveného napätia. Po uhasnutí oblúka zostanú vplyvom vysokej teploty oblúka ohriate miesta na kontaktoch, ktoré nazývame miesta päty oblúka. Z týchto miest, ktoré majú vysokú teplotu sa emitujú elektróny do medzikontaktného priestoru. Čím je tok elektrónov väčší, tým je elektrická pevnosť prostredia medzikontaktmi menšia. Na elektrickú pevnosť prostredia majú taktiež vplyv pary kontaktných materiálov. Tieto pary vznikajú splyneným čiastočiek kontaktov vplyvom elektrického oblúka[4].

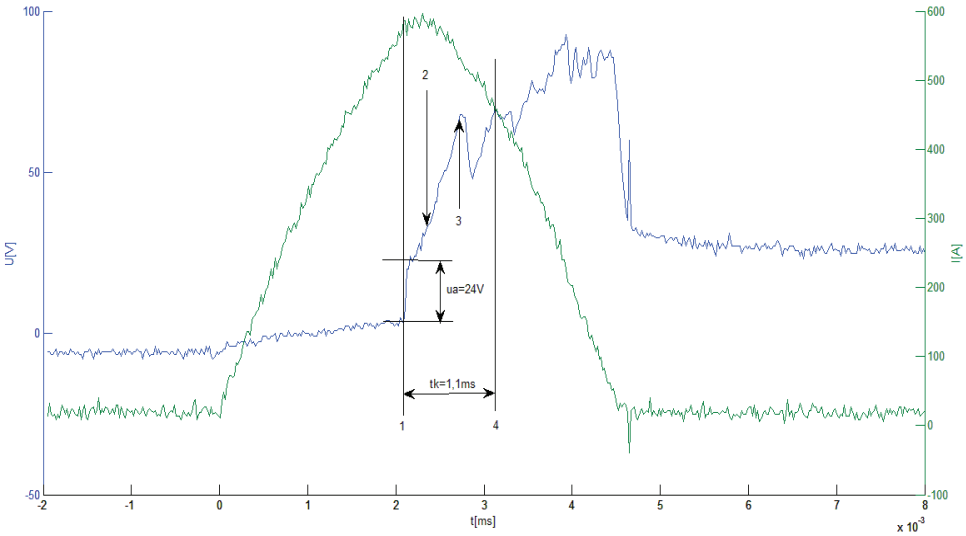
Pri materiáli vyrobenom práškovou metalurgiou majú jeho zložky rozdielne výparné teploty. Preto dochádza k tomu, že materiál s nižšou výparnou teplotou sa odparí a druhá zložka sa uvoľní v pevnej fáze [4].

Kontakty do vypnutého stavu sú ťahané pružinou, ktorú uvoľní vypínací mechanizmus. Popud vypínaciemu mechanizmu dá buď skratová spúšť alebo pri preťaženiach bimetalový pásik. Veľkosť sily, ktorá odťahuje kontakty musí byť značná, aby sa oblúk nachádzal v medzikontaktnom priestore čo najkratšie. Krátky čas horenia elektrického oblúka medzi kontaktmi je nutný preto, aby nedochádzalo k nataveniu kontaktov, opalu elektrickým oblúkom a tým výparu materiálu kontaktov a uvoľňovaniu čiastočiek do medzikontaktného priestoru. Ďalej aby nevznikali päty oblúka, ktoré emitujú elektróny do medzikontaktného priestoru. Všetky tieto faktory zhoršujú elektrickú pevnosť v medzi kontaktnom priestore, ktorá je dôležitá, keď elektrický oblúk uhasne, aby vplyvom zotaveného napätia sa oblúk znova nezapálil.

5 MERANIE NA MODULÁRNOM NN ISTIČI

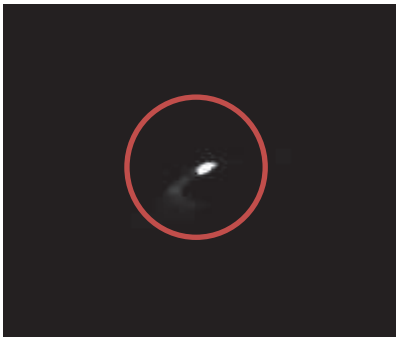
Skúška bola realizovaná na skratovej stolici na modulárnom nn ističi typu B s menovitým prúdom 10 A. Skratová spúšť by v tomto prípade mala zareagovať už pri 30 až 50A. Meraním pozorujeme pomocou osciloskopu a vysokorýchlostnej kamery správanie kontaktného systému a elektrického oblúku v ističi pri vypínaní skratového prúdu. Sledujeme nárast oblúkového napätia a dĺžky elektrického oblúka.

5.1 Skúška na skratovej stolici pri U=50V



Obrázok 5.1-1 Test ističa nn pri 50V

Z grafu môžeme pozorovať, že k oddiaľovaniu pohyblivého kontaktu od pevného nastalo v čase $t_1 = 2{,}09\ ms$ pri prúde $586{,}7A$. Ako sme si uviedli v kapitole 5, skratová spúšť reaguje už pri 30 až 50A. Z tohto poznatku je možné určiť dobu mechanizmu spúšte spolu s vypínacím mechanizmom, ktorý oddiaľuje kontakty zo zapnutej polohy do vypnutej. Z hľadiska veľkej strmosti skratového prúdu a veľkej citlivosti skratovej spúšte je možné povedať, že tento čas bude v bode jedna $t_1 = 2{,}09\ ms$. Ako náhle dôjde čo i len k malému vzdialeniu kontaktov zo zapnutej polohy smerom k vypnutej, elektrický oblúk sa zapáli a tým aj vzrastie oblúkové napätie u_a. Zapálenie elektrického oblúku môžeme pozorovať na obrázku 5.1-2. V čase $t_{ua50} = 2{,}19\ ms$ vzrástlo oblúkové napätie na hodnotu $u_a = 24\ V$. Z odhadu môžeme usúdiť, že v tomto okamihu je dĺžka elektrického oblúka $l_{ua} = 2\ mm$. Z tohto odhadu je možné určiť dĺžku oblúka za predpokladu, že nárast oblúkového napätia elektrického oblúku bude lineárny pokiaľ sa kontakty budú oddiaľovať a oblúk bude medzi nimi horieť. Túto časť grafu ohraničuje čas t_1 po čas t_3, v ktorom oblúk naposledy horí medzi kontaktmi. V čase $t3$ je hodnota oblúkového napätia $u_a = 68V$, čo zodpovedá dĺžke oblúka približne $l_{50} = 5{,}7\ mm$ za predpokladu, že $24V = 2mm$ dĺžke oblúka. V čase $t_4 = 3{,}19ms$ kontakt dolieha na vodiaci plech. Intenzita elektrického poľa v t_3 mala hodnotu $E_{50} = 11{,}930\ kVm^{-1}$.



Obrázok 5.1-2Zapálenie elektrického oblúka v čase t_1=2,09 ms

Obrázok 5.1-3Elektrický oblúk v čase t_{ua50}= 2,19ms

Obrázok 5.1-4Elektrický oblúk v čase t_2= 2,44ms

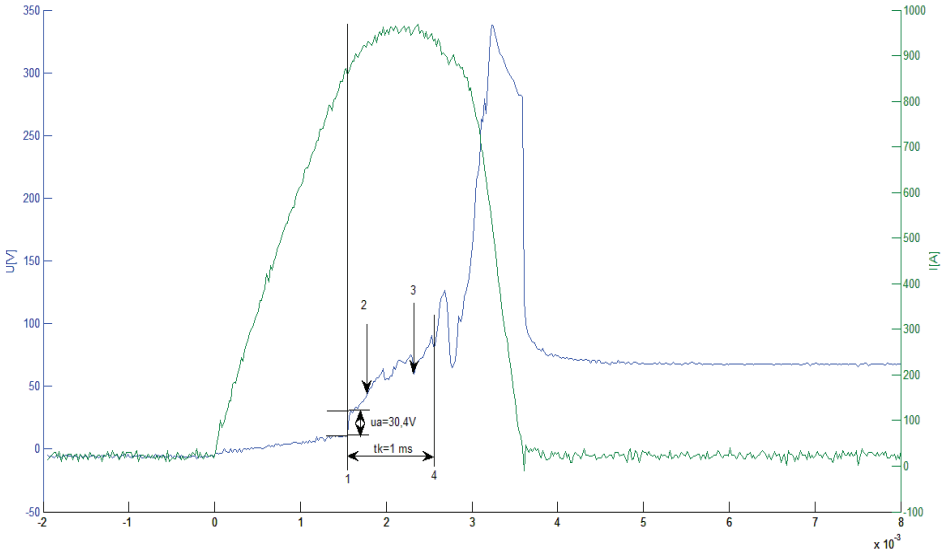
Na obrázku 5.1-4 môžeme pozorovať zakrivenie elektrického oblúka. Zakrivenie je spôsobené vyfukovaním elektrického oblúka do zhášacej komory silou, ktorá je výsledkom pôsobením magnetického poľa prúdového záhybu na elektrický oblúk. V čase t_2 je hodnota oblúkového napätia *ua= 32,8V* a dĺžka približne l_2*=1,4 mm*.

Obrázok 5.1-5Elektrický oblúk v čase t_3= 2,79ms

Obrázok 5.1-6Elektrický oblúk v čase t_4= 3,19ms

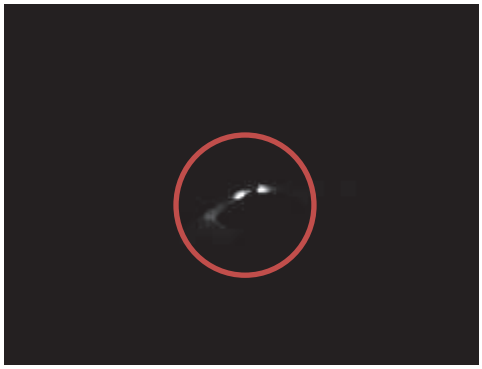
V čase t3 posledný krát pozorujeme horenie oblúka medzi kontaktmi. Oblúkové napätie *ua= 68V* a l_3*= 5,7 mm*. Na obrázku 5.1-6 pozorujeme, ako je oblúk vháňaný do zhášacej komory. V čase t_4*= 3,19 ms* doľahol pohyblivý kontakt na vodiaci plech, čím sa ukončil celkový pohyb kontaktu. Oblúkové napätie v tomto okamihu má hodnotu *ua= 69,6V*. Celkový čas, počas ktorého dochádzalo k pohybu kontaktov bol t_{k50}*= 1,1 ms*.

5.2 Skúška na skratovej stolici pri U=100V



Obrázok 5.2-1 Test ističa nn pri 100V

Z grafu môžeme pozorovať, že k oddiaľovaniu pohyblivého kontaktu od pevného nastalo v čase $t_1 = 1,55\ ms$ pri prúde $858,7A$. Dobu mechanizmu spúšte spolu s vypínacím mechanizmom môžeme opäť považovať $t_1 = 1,55\ ms$ kvôli veľkej strmosti skratového prúdu a citlivosti skratovej spúšte. Pozorujeme, že čas t_1 sa oproti skúške pri 50V zmenšil. To je spôsobené rýchlejším vybavením vypínacieho mechanizmu skratovou spúšťou. Z tohto sa dá usúdiť, že vypínací mechanizmus má vypínaciu dobu konštantnú. Doba skratovej spúšte bude teda závisieť od veľkosti vypínacieho prúdu a od strmosti vypínacieho prúdu. Opäť je možné odhadnúť dĺžku elektrického oblúku za predpokladov uvedených v predchádzajúcej kapitole. V čase $t_{ua100} = 1,6\ ms$ narástlo oblúkové napätie na hodnotu $ua = 30,4\ V$ a približná dĺžka oblúku bola $l_{ua} = 2\ mm$. Posledný okamih, kedy horel elektrický oblúk medzi kontaktmi je v čase $t_3 = 2,34\ ms$ a oblúkové napätie malo hodnotu $ua = 67,2\ V$. Dĺžka elektrického oblúku v tomto okamžiku bola $l_{100} = 4,42\ mm$. Intenzita elektrického poľa v t_3 mala hodnotu $E_{100} = 15,203\ kVm^{-1}$.



Obrázok 5.2-2Zapálenie elektrického oblúka v čase t_1=1,55ms

Pozorujeme zapálenie elektrického oblúka na dvoch miestach kontaktov.

Obrázok 5.2-3Elektrický oblúk v čase t_{ua100}= 1,6ms

Obrázok 5.2-4Elektrický oblúk v čase t_2= 1,8ms

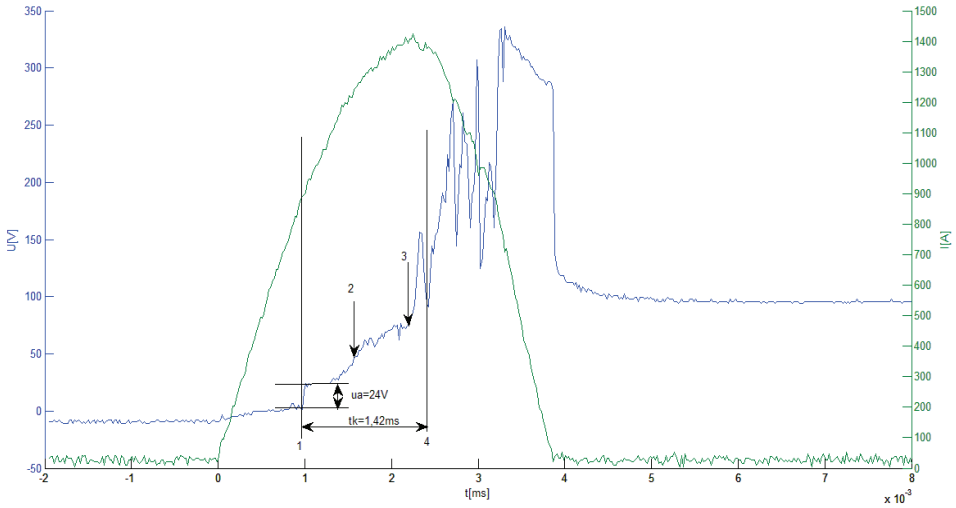
V čase t_2 je hodnota oblúkového napätia *ua= 48V* a dĺžka približne l_2*=3,16 mm*. Zakrivenie elektrického oblúka je spôsobené opäť elektrodynamickou silou, ktorá je spôsobená prúdovým záhybom, ako v predošlej kapitole.

Obrázok 5.2-5Elektrický oblúk v čase t_3= 2,34ms

Obrázok 5.2-6Elektrický oblúk v čase t_4= 2,54ms

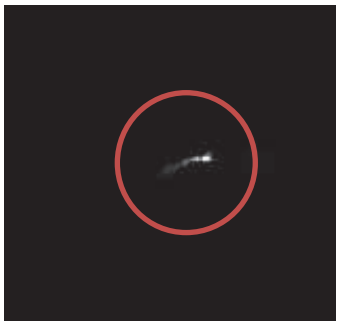
V čase t_3 posledný krát pozorujeme horenie oblúka medzi kontaktmi. Oblúkové napätie má hodnotu *ua= 67,2V* a dĺžka elektrického oblúku l_3*= 4,42 mm*. Avšak na obrázku 5.2-5 je viditeľné, že dĺžka oblúku bude väčšia ako sme približne odhadli, čo je spôsobené magnetickým vyfukovaním oblúka smerom do komory. Tento odhad bude tým nepresnejší, čím bude väčší vypínací prúd a tým aj elektrodynamická sila vháňajúca oblúk do zhášacej komory. Na obrázku 5.1-6 pozorujeme, ako je oblúk vháňaný do zhášacej komory. V čase t_4*= 2,54 ms* doľahol pohyblivý kontakt na vodiaci plech, čím sa ukončil celkový pohyb kontaktu. Oblúkové napätie v tomto okamihu má hodnotu *ua= 81,6V*. Celkový čas, počas ktorého dochádzalo k pohybu kontaktov bol t_{k100}*= 1 ms*.

5.3 Skúška na skratovej stolici pri U=150V

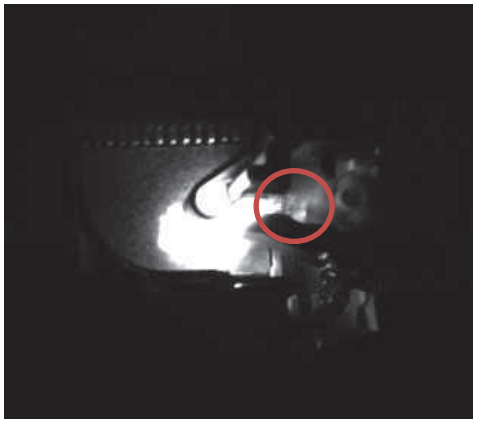


Obrázok 5.3-1 Test ističa nn pri 150V

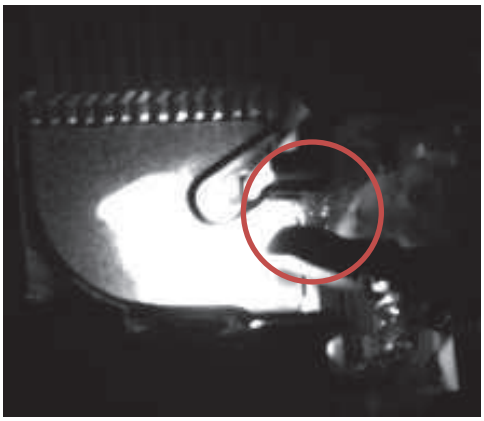
Z grafu môžeme pozorovať, že k oddiaľovaniu pohyblivého kontaktu od pevného nastalo v čase $t_1 = 0,97\ ms$ pri prúde $890,7A$. Dobu mechanizmu spúšte spolu s vypínacím mechanizmom môžeme opäť považovať $t_1 = 1,55\ ms$ kvôli veľkej strmosti skratového prúdu a citlivosti skratovej spúšte. Pozorujeme, že čas t_1 sa oproti skúške pri 100 a 50V zmenšil. Dôvod zmenšenia času som spomenul v predchádzajúcej kapitole. Opäť je možné odhadnúť dĺžku elektrického oblúku za predpokladov zmienených v predchádzajúcej kapitole. V čase $t_{ua150} = 1\ ms$ narástlo oblúkové napätie na hodnotu $ua = 24\ V$ a približná dĺžka oblúku bola $l_{ua} = 2\ mm$. Posledný okamih, kedy horel elektrický oblúk medzi kontaktmi je v čase $t_3 = 2,21\ ms$ a oblúkové napätie malo hodnotu $ua = 75,2\ V$. Dĺžka elektrického oblúku v tomto okamihu bola $l_{150} = 6,27\ mm$. . Intenzita elektrického poľa v t_3 mala hodnotu $E_{150} = 11,994\ kVm^{-1}$.



Obrázok 5.3-2Zapálenie elektrického oblúka v čase t_1=0,97ms



Obrázok 5.3-3Elektrický oblúk v čase t_2= 1,57ms



Obrázok 5.3-4Elektrický oblúk v čase t= 1,67ms

V čase t_2 je hodnota oblúkového napätia *ua= 46,4V* a dĺžka elektrického oblúku približne l_2*=3,87 mm*. Zakrivenie elektrického oblúka je spôsobené opäť elektrodynamickou silou, ktorá je spôsobená prúdovým záhybom ako v kapitole 5.1.

V čase *t= 1,67 ms* je možné pozorovať vplyv opaľovania kontaktov elektrickým oblúkom. Sú viditeľné roztavené čiastočky z kontaktov, ktoré sa dynamicky šíria vnútorným priestorom ističa. Tento jav sa udial hlavne kvôli tomu, pretože od času t_1 oblúk horel približne 0,35 ms medzi kontaktmi bez toho, aby sa výrazne oddialili. Vzdialenosť medzi nimi v tom čase bola približne 1 až 2 mm. Táto malá vzdialenosť a dlhý čas spôsobili natavenie kontaktov.

Obrázok 5.3-5Elektrický oblúk v čase t_3= 2,21ms

Obrázok 5.3-6Elektrický oblúk v čase t_4= 2,4ms

V čase t_3 posledný krát pozorujeme horenie oblúka medzi kontaktmi. Oblúkové napätie má hodnotu *ua= 75,2V* a dĺžka elektrického oblúku l_3*= 6,27 mm*. Avšak na obrázku 5.3-5 je viditeľné, že dĺžka oblúku bude väčšia, ako sme približne odhadli. Dôvod je vysvetlený v predošlej kapitole. Na obrázku 5.3-6 pozorujeme, ako je oblúk vháňaný do zhášacej komory. V čase t_4*= 2,4 ms* doľahol pohyblivý kontakt na vodiaci plech, čím sa ukončil celkový pohyb kontaktu. Oblúkové napätie v tomto okamihu má hodnotu *ua= 94,4V*. Celkový čas, počas ktorého dochádzalo k pohybu kontaktov bol t_{k150}*= 1,42 ms*. Celkový čas pohybu kontaktov sa od skúšky pri *U=100 V* zväčšil, čo bolo spôsobené tým, že kontakty na začiatku vypínania zotrvali približne

v tej istej polohe asi *0,35 ms*. Principiálne sme ale pri skúške pri *U= 100 V* potvrdili, že doba pohybu kontaktov sa zmenší od veľkosti vypínaného prúdu. To spôsobí vplyv prúdového záhybu, kedy smer prúd,u ktorý tečie ním a pohyblivým kontaktom je opačná a tým vznikajú magnetické polia, ktorých siločiari majú rovnaký smer a preto sa odpudzujú. Vzniká elektrodynamická sila, ktorá urýchľuje pohyblivý kontakt. Týmto systémom vykazuje istič obmedzujúce účinky.

5.4 Zhrnutie

Ak porovnáme jednotlivé skúšky pri napätiach U= 50, 100 a 150V, môžeme povedať, že veľkosť vypínaného prúdu má veľký vplyv na čas počas, ktorého pohyblivý kontakt doľahne na vodivú stenu a na dĺžku elektrického oblúka ktorý horí medzi kontaktmi. Pri skúške pri *U=50 V* došlo k za počatiu oddiaľovania kontaktov pri I_{50}= *586,7 A*. Čas pokiaľ pohyblivý kontakt doľahol na vodivú stenu t_{k50}= *1,1ms*. Pri *U= 100 V* a I_{100}= *858,7 A* bol čas t_{k100}= *1 ms* a pri *U=150 V* a I_{150}=*890,7 A* bol čas t_{k150}= *1,42ms*. Z teoretického hľadiska by mal byť čas $t_{k150} < t_{k100} < t_{k50}$ vplyvom veľkosti prúdu, ktorý má vplyv na elektrodynamickú silu, ktorá urýchľuje rýchlosť pohyblivého kontaktu smerom do vypnutej polohy. Ďalším aspektom je rýchlejšie vybavenie skratovej spúšti vplyvom strmosti vypínaného prúdu. V prípade časov, ktoré charakterizovali dobu, kedy pohyblivý kontakt doľahne na vodivú stenu to potvrdili iba časy $t_{k100} < t_{k50}$. Doba t_{k150} bola najdlhšia z pomedzi všetkých skúšok, čo je viditeľné na obrázku 5.3-1, kde môžeme pozorovať oblúkové napätie *ua= 24V* asi 0,3ms čo charakterizuje, že počas tejto doby sa kontakty od seba vôbec neoddiaľovali. Napriek tomu teoretický predpoklad potvrdzujú všetky tri skúšky a to časom, počas ktorého došlo k vybaveniu skratovej spúšte, vybaveniu vypínacieho mechanizmu, ktorý bol skracovaný vplyvom elektrodynamickej sily, ktorá urýchľovala pohyblivý kontakt smerom do vypnutej polohy. Pri *U= 50 V* je t_{ua50}= *2,19ms* pri *U= 100 V* je t_{ua100}= *1,6ms* a pri *U=150V* je t_{ua150}= *1ms*. V tomto prípade platí, že $t_{ua150} < t_{ua100} < t_{ua50}$ čo potvrdzuje môj predpoklad. Dĺžka elektrického oblúka sa taktiež zväčšovala so zvyšovaním skúšobného napätia vplyvom pôsobenia elektrodynamickej sily, ktorá vháňala oblúk do zhášacej komory. Veľkosť tejto sily závisela od veľkosti vypínaného prúdu. Pri *U= 50V* a I_{50}= *586,7 A* bola dĺžka elektrického oblúku l_{50}= *5,7mm* v čase kedy elektrický oblúk naposledy horel medzi kontaktmi t_3= *2,79ms*, pri U= 100V a I_{100}= 858,7 A l_{100}= 4,42mm t_3= 2,34ms, pri U=150V a I_{150}=890,7 A l_{150}= *6,27mm* t_3= *2,21ms*. Pri skúške pri *U= 150V* môžeme v čase t_2 a t_3 pozorovať pevné čiastočky kontaktu, ktoré sú vymrštené do priestoru vplyvom odparenia materiálu s menšou výparnou teplotou. Čiastočky sú z materiálu s vyššou výparnou teplotou, teda z Ag. Urýchľovaním kontaktu a tým aj skracovaním času, počas ktorého oblúk uhasne istič vykazuje obmedzovacie účinky.

6 NÁVRH MERANIA CHOVANIA KONTAKTNÉHO SYSTÉMU POMOCOU VYSOKORÝCHLOSTNEJ KAMERY

Aby sme meraním vedeli preštudovať dynamické správanie kontaktného systému, je nutné pozorovať pohyb kontaktu a dĺžku elektrického oblúka. V tomto prípade vzniká rozpor v zmysle : chceme aby pohyb kontaktu bol pozorovateľný, to znamená, aby bol dostatočne osvetlený a naopak v prípade elektrického oblúka chceme, aby bol čo najviac potlačený jeho jas, aby sme pozorovali iba jeho jadro. Oba deje prebiehajú v jednom časovom období a preto je nutné zvoliť kompromis v oboch prípadoch. Tento kompromis bol realizovaný pomocou zvolenia vhodného nastavenia kamery, vhodného výberu krytu ističa, vhodného spektrálneho filtra, a v poslednom rade nasvietenie kontaktu pomocou laserových svietidiel.

6.1 Úprava ističa

Aby mohli byť kontakty a elektrický oblúk pozorovateľné kamerou, je nutné vytvoriť v bočnom kryte ističa vhodný otvor. Otvorom sme odhalili pohyblivý kontakt a to tak, aby sme mohli pozorovať jeho celkový pohyb pri vypínaní zadaných prúdov a elektrický oblúk, ktorý horel medzi pohybujúcim kontaktom a vodiacou stenou. Avšak v tomto prípade došlo k narušeniu termodynamických pomerov vo vnútri ističa. Tento problém sme vyriešili použitím vhodného krytu, ktorý vytvorený otvor zakryl a zároveň napomáhal eliminovať značný jas elektrického oblúka pri vypínaní elektrického oblúka. Kryt bol pripevnený pomocou vhodného materiálu na bočný kryt ističa tak, aby sme čo najviac hermeticky uzatvorili daný otvor a tým zachovali prirodzené termodynamické pomery vo vnútri ističa.

6.2 Kryty

Ideálny kryt pre danú aplikáciu by mal spĺňať tieto podmienky. Počas generovaného tepla elektrickým oblúkom by mal vykazovať stálosť, čo znamená, že by sa nemal taviť, ani meniť svoje filtračné a iné vlastnosti. Mal by prepúšťať iba také množstvo svetla, ktoré by dostatočne osvetlilo pohybujúci kontakt a zároveň by bolo cez neho pozorovateľné iba jadro elektrického oblúka. V poslednom rade by sa naň nemali prichytávať odparené čiastočky kovov a plastov pri horení elektrického oblúka v ističi.

Takýto kryt neexistuje. Použili sme celkovo 2 typy krytov a to: magnetický kotúč z diskety, ND filter. Najpriaznivejšie výsledky sme získali pri použití ND filtra spolu s vhodným nastavením kamery.

6.3 Nastavenie kamery

Nastavenie kamery sme prispôsobili objektu, ktorý snímame. Objektom bol pohyblivý kontakt ističa, ktorý sa pri zapôsobení skratovej spúšte od seba vzďaľoval. Tento dej bol sprevádzaný elektrickým oblúkom. Keďže jas oblúka je značný a rýchlosť oddialenia kontaktov veľká, je nutné zvoliť dostatočnú snímaciu frekvenciu, veľkosť clony, čas uzávierky a to tak, aby snímaný objekt nebol príliš tmavý ani svetlý. V našom prípade bolo najčastejšie používaná snímacia frekvencia 40000 fps, clona na objektíve 16 a uzávierka 10μs.

V prípade nutnosti sme použili spektrálny filter 807 nm. Tento filter nám prepúšťal iba infračervenú zložku spektra elektrického oblúka.

6.4 Použitie lasera

Pri použití lasera bolo nutné na objektív primontovať spektrálny filter 807 nm, pretože spektrom lasera je práve v infračervenej oblasti a z dôvodu vyfiltrovania spektra elektrického oblúka a tým aj potlačenia jeho jasu. V tomto prípade sme použili na ešte väčšie potlačenie jasu elektrického oblúka uzávierku na kamere 1μs.

Toto použitie je momentálne nepoužiteľné a je nutné vyriešiť zásadné problémy, ktoré vykazuje.

Prvý problém vznikol už pri kryte. Nasvietením pomocou lasera sa jeho časť kde sa nachádzal kontaktný systém od ND filtra odrazila a tým presvetlila práve túto časť. Riešením by bolo dostatočné rozptýlenie lasera.

Druhý zásadný problém vznikol v trigrovaní kamery a lasera. Keďže laser nesvietil konštantne ale vytvárali sa takzvané pulzy, bolo nutné nastaviť laser tak, aby sa tento pulz vygeneroval na každú snímku záznamu. V prípade môjho nastavenia kamery na snímaciu frekvenciu 40000 fps bolo nutné nastaviť laser na f= 40000 Hz. Ďalej sme nastavili dobu trvania pulzu a to 1μs. V tomto stave by malo všetko fungovať iba v prípade, že sa obe zariadenia (kamera aj laser) spustia v ten istý okamih. Keďže zjavne obe zariadenia nikdy nezareagujú na triger v rovnakom čase, vzniká situácia, kedy je uzávierka kamery otvorená a pulz lasera v tomto čase nie je generovaný alebo naopak. V tomto prípade vzniká pomalé rozsvetľovanie a stmavovanie scény, v dôsledku toho nedochádza k nasvieteniu kontaktu v čase, kedy dochádza k jeho oddiaľovaniu. Riešením by bolo predĺženie času uzávierky, ale tým by vzrástol opäť jas elektrického oblúka a presvetlenie scény.

6.5 Spracovanie záznamu

V tomto bode bolo potrebné prispôsobiť daný záznam mojim potrebám a navrhnúť metódu merania dráhy kontaktu a dĺžky oblúka. To znamenalo v programe PFV (Photron FASTCAM Viewer) vhodne spraviť korekciu γ žiarenia, ak bola potrebná. Následne orezať záznam iba na potrebný úsek, nakalibrovať vzdialenosť medzi dvoma bodmi kvôli reálnemu odčítavaniu dĺžky oblúka, odčítať na všetkých snímkach, na ktorých horel oblúk medzi pohybujúcim sa kontaktom a vodiacou stenou dĺžku oblúka, umiestniť vhodný obdĺžnik na všetky snímky, kde dochádzalo k pohybu kontaktu a následne na každom tomto snímku odčítať uhol, ktorý sa zvieral medzi pevným kontaktom ľavým horným rohom obdĺžnika a pohybujúcim sa kontaktom.

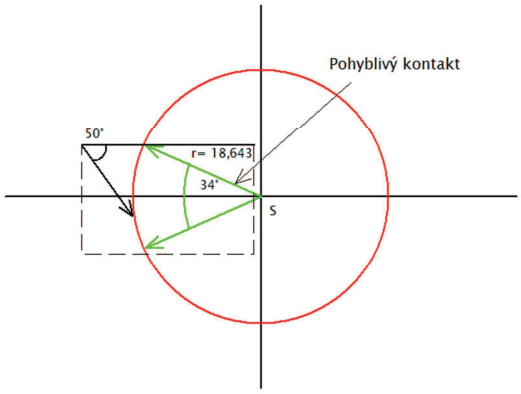
Obdĺžnik bol umiestnený tak, aby jeho horná strana bola v rovine s pevným kontaktom.

Na zrealizovanie tejto metódy bolo potrebné odmerať dĺžku pohyblivého kontaktu od jeho osy otáčania a vzdialenosť vodiacich stien, medzi ktorými sa pohyboval kontakt z hľadiska kalibrácie vzdialenosti medzi dvoma bodmi a uhol medzi počiatočnou a konečnou polohou kontaktu.

6.5.1 Princíp určenia okamžitej dráhy kontaktu

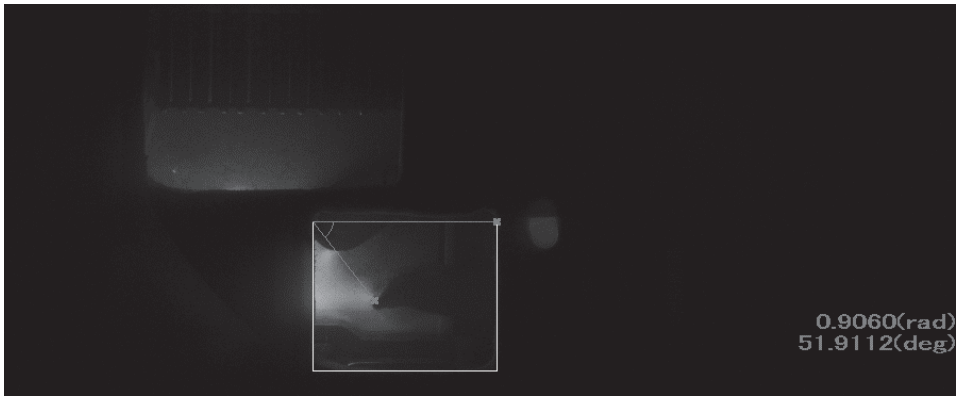
Princíp metódy spočíval v určení okamžitej dráhy kontaktu, ktorú do daného okamihu prekonal a to pomocou určenia celkovej dráhy kontaktu, ktorú vykoná a ktorá je vždy v každom meraní konštantná. Potom v určení uhla, ktorý sa zvieral medzi pevným kontaktom vrcholom obdĺžnika a pohybujúcim sa kontaktom. Ďalej bolo potrebné určiť konečnú polohu kontaktu a uhol. Tento uhol značil, že pohyblivý kontakt prekonal svoju konštantnú dráhu. Nakoniec

stačilo určiť dráhu na 1° a vynásobiť získanými uhlami v daných okamihoch. Celková dráha kontaktu bola vždy 11,05mm. Túto dráhu som vypočítal z nameraných rozmerov pohyblivého kontaktu a odmeraním uhla medzi zapnutým a vypnutím kontaktom.

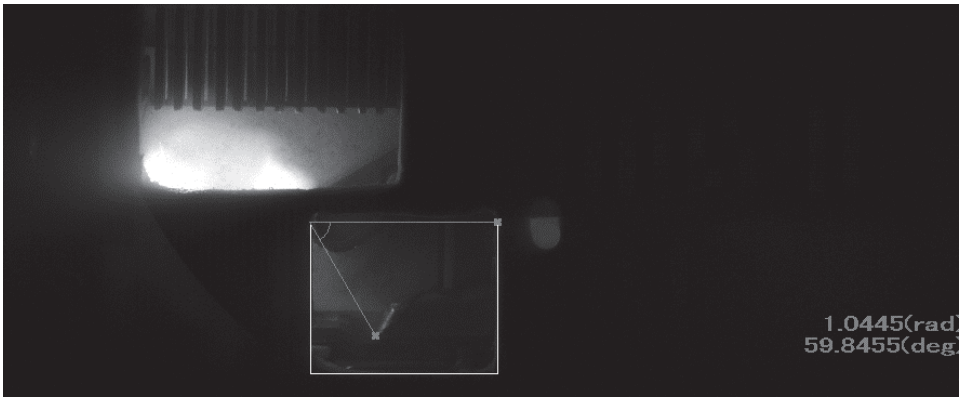


Obrázok 6.5-1Určenie dráhy pohyblivého kontaktu v daný okamžik

Ukážka určovania dráhy pohyblivého kontaktu:



Obrázok 6.5-2Kontakt v pohybe ,10B, I=1035A



Obrázok 6.5-3Kontakt v konečnej polohe ,10B, I=1035A

6.5.2 Princíp určenia okamžitej dĺžky elektrického oblúka

V tomto prípade som sa snažil určiť strednú okamžitú dĺžku elektrického oblúka pokiaľ horel medzi pohyblivým kontaktom a stenou. Určovanie prebiehalo nakalibrovaním vzdialenosti medzi dvoma bodmi a následne meraním strednej dĺžky elektrického oblúka. V tejto metóde vznikal problém s odhadom, kde sa nachádzalo jadro oblúka a tým aj jeho odmeraním. V počiatku vzniku, kedy jas oblúka nebol tak výrazný sa tento problém príliš neuplatňoval. S postupným pohybom pohyblivého kontaktu sa elektrický oblúk predlžoval a jeho jas narastal, kedy bolo problematické určiť strednú dĺžku oblúka. Týmto sa zanášala do merania istá chyba.

Ukážka určovania dĺžky elektrického oblúka:

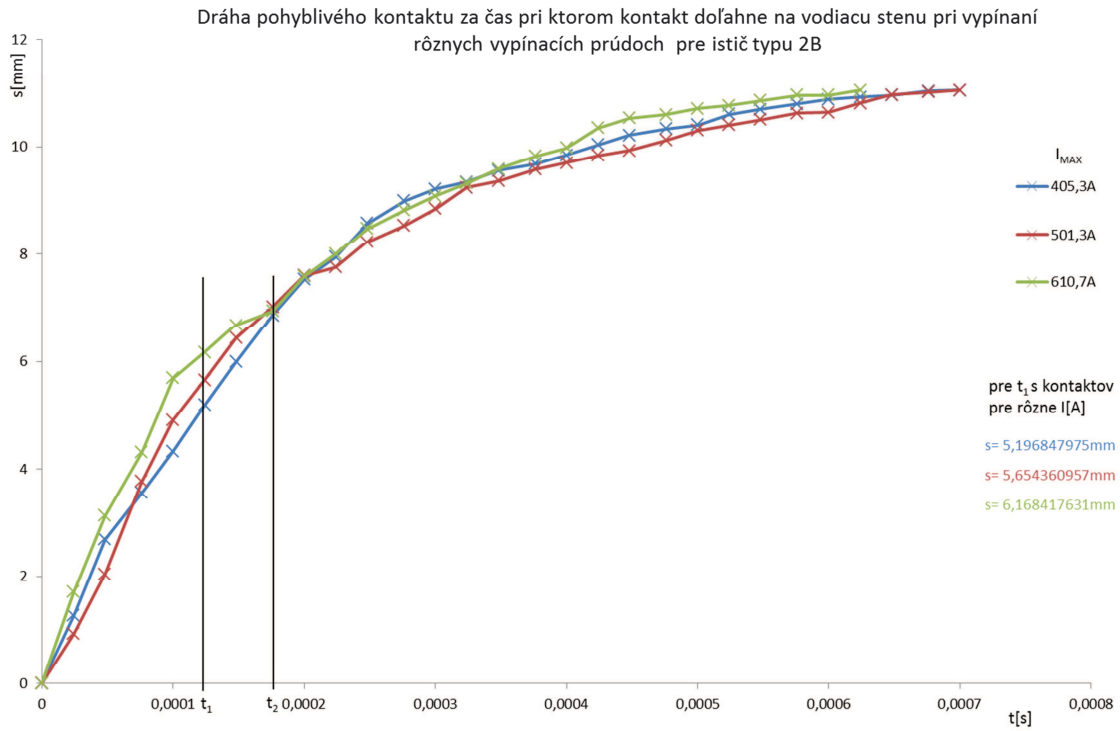
Obrázok 6.5-4Určenie dĺžky elektrického oblúka v počiatku oddiaľovania pohyblivého kontaktu

Obrázok 6.5-5Určenie dĺžky elektrického oblúka na konci oddiaľovania pohyblivého kontaktu

7 DYNAMICKÉ CHOVANIE KONTAKTNÉHO SYSTÉMU V RÔZNYCH STAVOCH

Zo získaných záznamoch a ich spracovaním spolu so získanými hodnotami elektrického prúdu, ktorý prechádzal cez istič a oblúkového napätia v čase, bolo možné posúdiť dynamické chovanie kontaktného systému v rôznych stavoch. Dynamické správanie kontaktného systému som pozoroval pre modulárne ističe a to typu 2B a 10B. Rôzne stavy som definoval ako maximálnu hodnotu prúdu, ktorá prechádzala cez daný istič. Dynamické chovanie kontaktného systému pre daný istič som definoval ako dve závislosti a to dráha kontaktu s= f(t) a dĺžka oblúka l= f(U_a).

7.1 Istič typu 2B

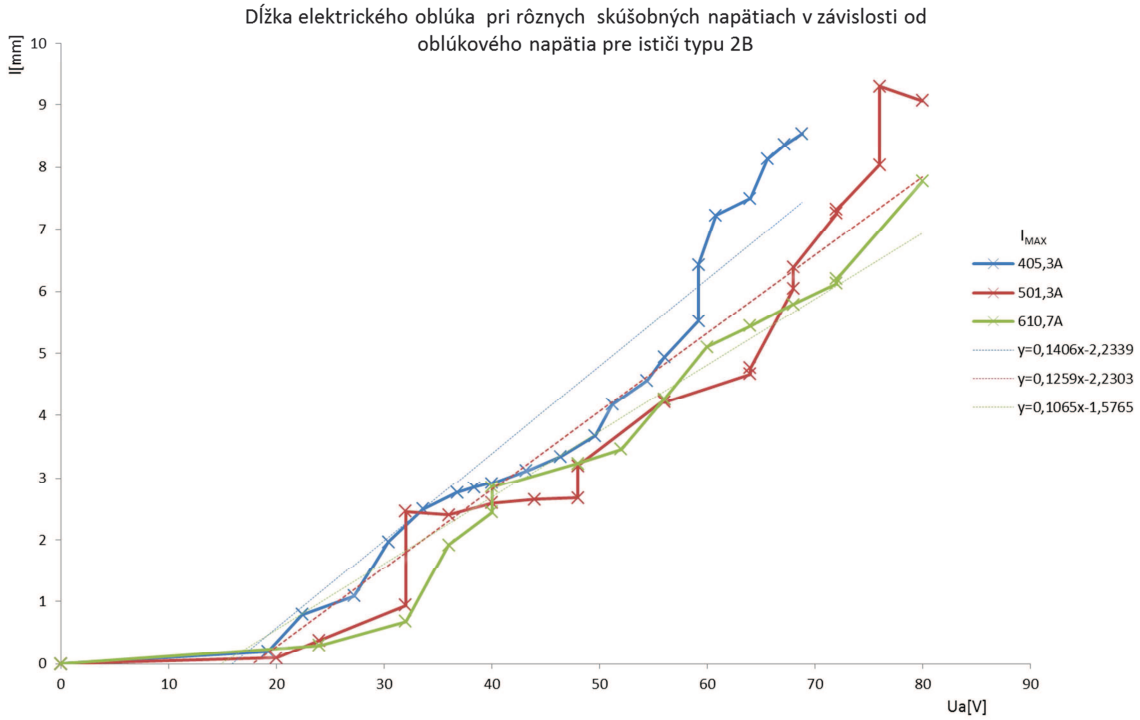


Obrázok 7.1-1Dráha kontaktu pri ističi 2B

Na tomto grafe je zobrazený priebeh dráhy pohybujúceho kontaktu v čase pre tri vypínacie prúdy. Priebeh som rozdelil čiarou označenou t_2. Do času t_2= *0,176 ms* pohyblivý kontakt pri jednotlivých vypínacích prúdoch zrýchľoval. Od času t_2 sa pohyblivý kontakt pohyboval zhruba konštantnou rýchlosťou. Pre čas t_1 a iné je možné pozorovať, že dráha *s [mm]* pohyblivého kontaktu je pre jednotlivé vypínacie prúdy rozdielna. Dráha sa zväčšuje s vypínacím prúdom. Tak isto môžeme z grafu vyčítať celkový čas pohybu kontaktu t_k *[ms]* od pevného kontaktu až po vodiacu stenu pre jednotlivé vypínacie prúdy. Z celkovej dráhy kontaktu s_c= *11,05 mm*, ktorá je pri všetkých skúškach konštantná a času t_k je možné vypočítať strednú hodnotu rýchlosti kontaktu pre jednotlivé vypínacie prúdy. Všetky spomínané hodnoty sú uvedené v tabuľke.

Tab. 7.1-1Dráha kontaktu pri ističi 2B

I_{MAX} [A]	s [mm]	t_k [ms]	v [ms^{-1}]
405,3	5,197	0,700	15,786
501,3	5,654	0,700	15,786
610,7	6,168	0,624	17,708



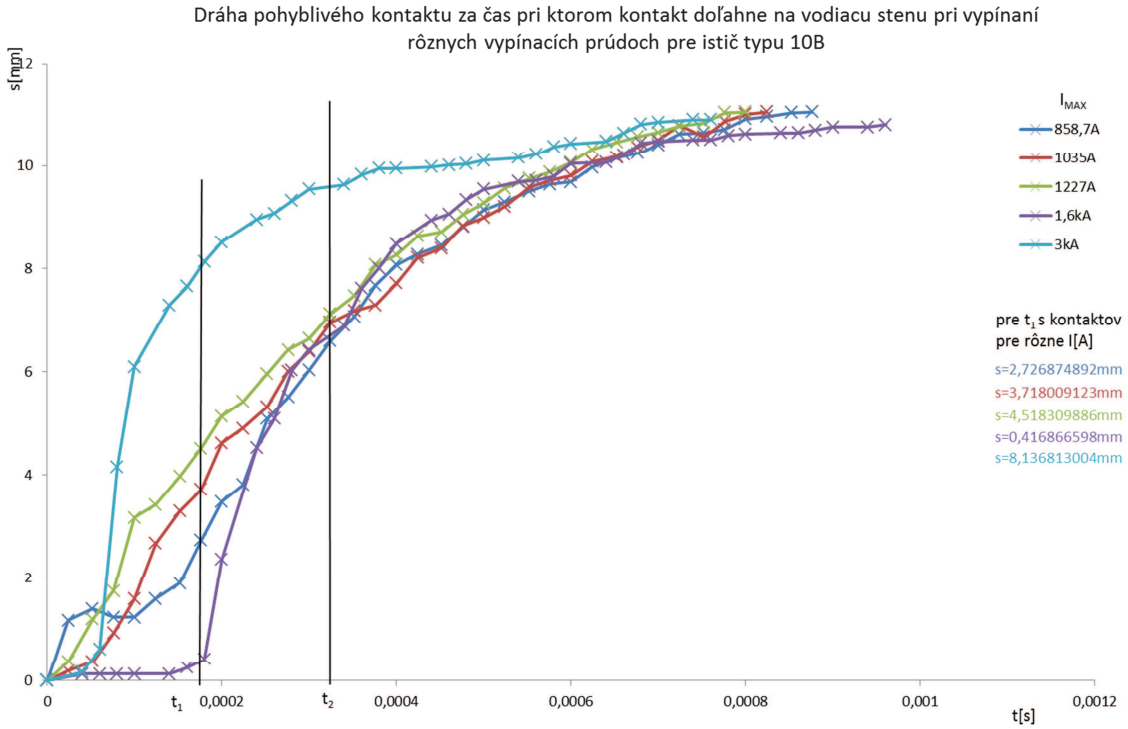
Obrázok 7.1-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 2B

Na grafe je zobrazený priebeh strednej dĺžky elektrického oblúka *l [mm]* od oblúkového napätia *Ua [V]* pre jednotlivé vypínacie prúdy. Z grafu je možné určiť hodnotu *Ua* a *l* pri prvotnom oddialení kontaktu v čase t_0. Ďalej som krivky preložil lineárnou priamkou, ktorá je charakterizovaná smernicou. Môžeme pozorovať, že smernica priamky s rastúcim vypínacím prúdom klesá. Ďalej je možné určiť *l* a *Ua* oblúka v čase t_h,, kedy posledný krát horel medzi pohyblivým kontaktom a vodiacou stenou. Jednotlivé hodnoty sú uvedené v tabuľke.

Tab. 7.1-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 10B

	t_0		t_h		Smernica
I_{MAX} [A]	Ua [V]	l [mm]	Ua [V]	l [mm]	y=ax+b
405,3	19,2	0,2	68,8	8,541	0,1406
501,3	20	0,1	80	9,066	0,1259
610,7	24	0,3	80	7,773	0,1065

7.2 Istič typu 10B

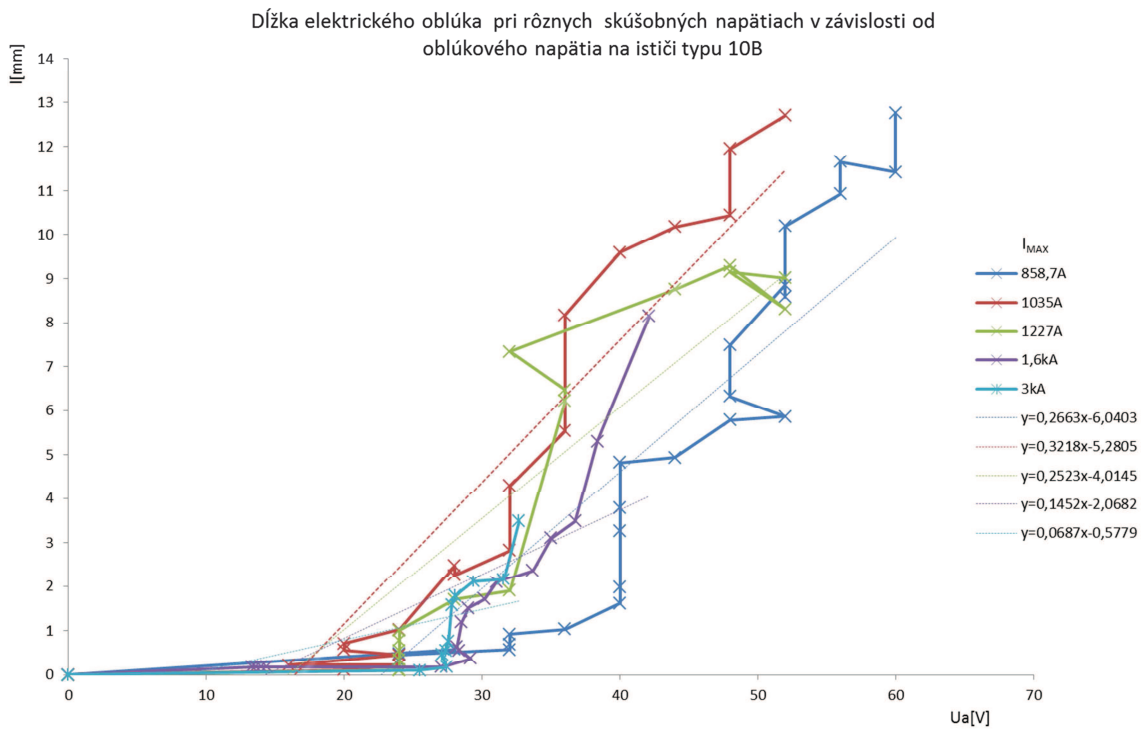


Obrázok 7.2-1Dráha kontaktu pri ističi 10B

Na tomto grafe je zobrazený priebeh dráhy pohybujúceho kontaktu v čase pre päť vypínacích prúdov. Priebeh som rozdelil čiarou označenou t_2. Do času t_2= *0,324 ms* pohyblivý kontakt pri jednotlivých vypínacích prúdoch zrýchľoval. Od času t_2 sa pohyblivý kontakt pohyboval zhruba konštantnou rýchlosťou. Pre čas t_1 a iné je možné pozorovať, že dráha *s [mm]* pohyblivého kontaktu je pre jednotlivé vypínacie prúdy rozdielna. Dráha sa zväčšuje s vypínacím prúdom, ale toto neplatilo akurát pre vypínací prúd I_{MAX}= 1,6kA. V tomto prípade nedošlo k oddiaľovaniu kontaktu takmer 18 ms. Avšak strmosť nárastu krivky naznačuje, že ak by táto situácia nenastala, pravdepodobne by správnie bolo podobné ako pri ostatných krivkách a dráha, ktorú by kontakt prekonal v čase t_1 by bola druhá najväčšia ako aj vypínací prúd. Z grafu je možné taktiež vyčítať celkový čas pohybu kontaktu t_k *[ms]* od pevného kontaktu až po vodiacu stenu pre jednotlivé vypínacie prúdy. Z celkovej dráhy kontaktu s_c= *11,05 mm,* ktorá je pri všetkých skúškach konštantná a času t_k je možné vypočítať strednú hodnotu rýchlosti kontaktu pre jednotlivé vypínacie prúdy. Všetky spomínané hodnoty sú uvedené v tabuľke.

Tab. 7.2-1Dráha kontaktu pri ističi 10B

I_{MAX} [A]	s [mm]	t_k [ms]	v [ms^{-1}]
858,7	2,727	0,876	12,614
1035	3,718	0,824	13,41
1227	4,518	0,8	13,813
1600	0,417	0,96	11,51
3000	8,137	0,76	14,539



Obrázok 7.2-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 2B

Na grafe je zobrazený priebeh strednej dĺžky elektrického oblúka *l [mm]* od oblúkového napätia *Ua [V]* pre jednotlivé vypínacie prúdy. Z grafu je možné určiť hodnotu *Ua* a *l* pri prvotnom oddialení kontaktu v čase t_0. Ďalej som krivky preložil lineárnou priamkou, ktorá je charakterizovaná smernicou. Môžeme pozorovať, že smernica priamky s rastúcim vypínacím prúdom klesá. Toto neplatí pre krivku pri vypínacom prúde I_{MAX}= 1035A, čo by mohlo byť spôsobené nepresnosťami pri odčítaní dĺžky elektrického oblúku zo záznamu. Ďalej je možné určiť *l* a *Ua* oblúka v čase $t_{h,}$, kedy posledný krát horel medzi pohyblivým kontaktom a vodiacou stenou. Jednotlivé hodnoty sú uvedené v tabuľke.

Tab. 7.2-2Dĺžka elektrického oblúka pri ističi 2B

	t_0		t_h		Smernica
I_{MAX} [A]	Ua [V]	l [mm]	Ua [V]	l [mm]	y=ax+b
858,7	28	0,5854	60	12,7551	0,266
1035	20	0,1128	52	12,6946	0,3218
1227	24	0,1	52	9,0149	0,2523
1600	13,313	0,183	42,125	8,144	0,1452
3000	25,5	0,1	32,688	3,482	0,069

7.3 Zhrnutie

Jednotlivé grafy a namerané hodnoty charakterizovali dynamiku a správanie kontaktného systému jednotlivých ističov. Pri ističi typu 2B ako aj pri ističi typu 10B v grafe (Dráha kontaktu pri ističi XY), sme pozorovali, že s nárastom vypínacieho prúdu sa dráha *s [mm]* v čase t_1 zväčšovala okrem jedného prípadu a to pri ističi typu 10B a vypínacom prúde $I_{MAX} = 1600A$. Čo bolo spôsobené neoddiaľovaním kontaktu 18ms. Dôvodom zväčšovania dráhy *s[mm]* v čase t_1 boli sily, ktoré pôsobili a urýchľovali pohyblivý kontakt. V počiatku rozopínania kontaktu to bola hlavne odpudivá sila medzi kontaktmi. Táto sila vznikala práve zúžením prierezu vodiča, ktorým vypínací prúd v danom mieste tiekol. Toto zúženie je reálne realizované nanesením kontaktného materiálu na pevný kontakt. V zúženom priestore tečením vypínacieho prúdu vzniká magnetické pole. Toto magnetické pole je súhlasné, čo znamená že sa odpudzuje. Keďže oba kontakty nie sú pevné ale jeden je pohyblivý, táto sila pôsobí hlavne proti prítlačnej sile pohyblivého kontaktu na pevný. Týmto môžeme tvrdiť, že v počiatku rozopínania je kontakt urýchľovaný hlavne touto silou. Odpudivá sila je úmerná druhej mocnine okamžitej hodnoty prechádzajúceho prúdu. To môžeme pozorovať na dráhe kontaktu pri rôznych vypínacích prúdoch. V časti, kedy je už kontakt v pohybe, pôsobí naň ďalšia sila a to odpudivá sila medzi pohybujúcim sa kontaktom a prúdovým záhybom. Táto sila vzniká v čase, kedy sa zapáli elektrický oblúk medzi pohybujúcim sa kontaktom a prúdovým záhybom. Pretekaním prúdu cez prúdový záhyb, elektrický oblúk a pohybujúci sa kontakt vzniká opäť súhlasné magnetické pole, ktoré sa odpudzuje a tým vzniká odpudivá sila medzi pohybujúcim sa kontaktom a prúdovým záhybom. Opäť veľkosť magnetického poľa a tým aj odpudivej sily závisí od vypínaného prúdu. Obe sily teda majú zásadný účinok na celkový čas pohybu kontaktu t_k a tým aj na jeho strednú rýchlosť, čo sme potvrdili meraním opäť až na spomínaný prípad pri ističi typu 10B a vypínacom prúde I_{MAX}= *1600 A*.

Ak porovnáme istič 2B a 10B môžeme povedať, že čas t_k bol pri 2B menší ako pri 10B, tým aj kontakt v prípade 2B sa pohyboval rýchlejšie. Merania na ističi 2B sú identické (pri rovnakom napätí) s prvými troma meraniami na ističi 10B. Istič 2B výraznejšie obmedzil vypínací prúd, pretože jeho skratová spúšť reaguje už pri menších prúdoch. V tomto momente vzniká paradox, že čas t_k bol kratší pri 2B ako pri 10B napriek tomu ,že pri 10B sú vypínacie prúdy väčšie, teda aj pôsobiace sily a za tohto predpokladu by mal byť čas t_k menší práve u ističa 10B. Tento jav vznikol rozdielne dimenzovanou skratovou spúšťou. V prípade ističa typu 2B by mala skratová spúšť zareagovať už pri 6-10. Avšak pri ističi 10B je táto hodnota väčšia 30-50 A. Pri týchto prúdoch je odpudivá sila medzi kontaktmi už natoľko veľká, že sa kontakty od seba o kúsok vzdialia, zmenší sa prítlačná sila F_k a zapáli sa elektrický oblúk, ale spúšť ešte nezareagovala a tak kontakt ostáva v danej polohe, pretože odpudivá sila medzi kontaktmi nie je natoľko veľká, aby prekonala prítlačnú silu F_k. Keďže sa začiatok prvotného oddialenia kontaktu bral od prvotného zapálenia elektrického oblúka, vznikol tento paradox. Môžeme to pozorovať aj na jednotlivých grafoch. V prípade ističa 2B pozorujeme nárast dráhy kontaktu od 0 času, v prípade ističa 10B tento nárast nemá takú strmosť, ako v prípade ističa 2B.

Z hľadiska dĺžky elektrického oblúka *l [mm]* a jeho oblúkového napätia *Ua [V]* pre jednotlivé ističe charakterizujú grafy (Dĺžka elektrického oblúka pri ističi XY). Pozorovali sme, že nárastom vypínaného elektrického prúdu klesala smernica priamky, ktorou sme preložili jednotlivé grafy, až na prípad pri ističi typu 10B pri vypínacom prúde I_{MAX}= *1035 A*. Pri meraní dĺžky bolo nutné správne odhadnúť, kde sa nachádza jadro elektrického oblúku. To sa však nie vždy podarilo, zvlášť v prípade kedy narastala teplota elektrického oblúka a tým aj jeho jas.

Z tohto hľadiska by som tento výsledok pripísal nepresnosti merania. Smernica priamky nám udáva sklon priamky, čo znamená, že čím bola smernica nižšia, tým na tú istú dĺžku elektrického oblúka pripadalo väčšie oblúkové napätie. Tento jav bol spôsobený opäť pôsobením síl na elektrický oblúk. Pri prvotnom oddialení pohyblivého kontaktu sa elektrický oblúk zapálil. Postupným pohybom kontaktu a pôsobením vyfukovacej sily na elektrický oblúk sa jeho pohyb urýchľoval. Vyfukovacia sila je taktiež závislá na veľkosti vypínaného prúdu a pôsobí na oblúk už od jeho zapálenia. Čím je vyfukovacia sila väčšia, tým sa elektrický oblúk prostredím v ističi pohybuje rýchlejšie. Čím sa elektrický oblúk rýchlejšie pohybuje daným prostredím, tým sa viac chladí. Preto pri tej istej dĺžke oblúka ale pri rôznych vypínacích prúdoch sa mení aj oblúkové napätie. Z toho vyplýva, že smernica priamky sa mení s veľkosťou vypínaného prúdu. Môžeme pozorovať, že nárastom vypínacieho prúdu, tým aj vyfukovacej sily, oblúk horí kratšiu dobu medzi kontaktmi a je vháňaný rýchlejšie do zhášacej komory.

8 ZÁVER

Mojou bakalárskou prácou som sa snažil preštudovať a uviesť dynamické správanie kontaktného systému v rôznych stavoch a pozorovať dĺžku elektrického oblúka pokiaľ horel medzi pohybujúcim kontaktom a vodiacou stenou. Túto úlohu som realizoval pomocou vysokorýchlostnej kamery Photron FASTCAM SA-2X a pomocou simulácií vypínacích prúdov v laboratóriu spínacích prístrojov a ich záznamov. Merania som realizoval na dvoch typoch modulárnych ističov a to typu 2B a 10B.

Zistili sme a overili teoretický predpoklad, že dynamika kontaktného systému sa mení s veľkosťou vypínacieho prúdu. Mení sa v takom zmysle, že dynamika a teda aj sily, ktoré pôsobili na pohyblivý kontakt sa zväčšovali so zväčšovaním vypínaného prúdu. To sme mohli pozorovať najmä na strednej rýchlosti pohybujúceho kontaktu a na dráhe kontaktu v čase t_1 vyznačenom na grafoch v konečnom dôsledku aj na celkovom čase pohybu pohyblivého kontaktu t_k pri jednotlivých vypínacích prúdoch.

Zistili sme a taktiež overili teoretický predpoklad ,že vplyvom vyfukovacej sily na elektrický oblúk a tým urýchľovaním jeho pohybu v danom prostredí, jeho oblúkové napätie *Ua [V]* pri tej istej dĺžke elektrického oblúku narastá spolu so zväčšovaním veľkosti vypínaného prúdu a tým aj vyfukovacej sily. To potvrdzujeme klesajúcou hodnotou smernice priamky, ktorou sme preložili jednotlivé krivky v grafoch so zväčšovaním vypínaného prúdu.

Pri každom spracovaní záznamu dochádzalo k vnášaniu chyby a to pri odčítaní dráhy kontaktu a strednej dĺžky jadra elektrického oblúku. V tomto prípade vznikala oveľa väčšia nepresnosť pri odčítaní strednej dĺžky jadra elektrického oblúku najmä v čase, kedy jeho teplota stúpala a tým sa zväčšoval jeho jas, čoho dôsledkom bolo presvetlenie daného snímku v mieste, kde sme pozorovali pohyb kontaktu a zároveň znemožnila presnejšie odmeranie strednej dĺžky jadra oblúku. Meranie by bolo presnejšie, ak by nám ostalo viac času na vyriešenie problému s laserovým nasvietením scény. Z dôvodu mesačnej odstávky laboratória spínacích prístrojov nebolo možné zrealizovať viac meraní.

LITERATÚRA

[1] PHOTRON USA, Inc. *FASTCAM SA-X2*. USA. Dostupné z: http://www.photron.com/?cmd=product_general&product_id=39

[2] LIBICH, Jan. *Co musí umět každý objektiv, aby fotky stály za to.* [online]. 2007, - [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/co-musi-umet-kazdy-objektiv-aby-fotky-staly-za-to-podrobny-pruvodce-11m-/tec_foto.aspx?c=A071108_120848_tec_foto_jlb

[3] ŠTASTNÝ, MICHAL. *MERENÍ A VYHODNOCENÍ VYSOKORYCHLOSTNÍHO DEJE*. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE, F, 2013. Bakalárska práca. VUT.

[4] HAVELKA, Otto., a kol.: *Elektrické přístroje* . SNTL/ALFA, Praha, 1985, 436 s.

[5] VÁVRA, Zdeněk. *Vysoké napětí a elektrické přístroje: Část II elektrické přístroje*. Elektronický text, FEKT VUT v Brně, 2003.