



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studie vypínací schopnosti vypínačů vn/zvn

Autor práce: Pavel Kopačka

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Vajnar

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel KOPAČKA**  
Osobní číslo: **E13B0044P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Studie vypínací schopnosti vypínačů vn/zvn**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

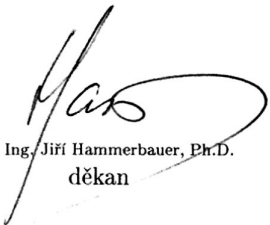
1. Prozkoumejte technologie používané v energetice ke zhasení spínacího oblouku, včetně historického vývoje.
2. Popište spínací děje na hladinách vn až zvn se zahrnutím časových a prostorových intervalů a jednotlivých rozdílů mezi danými napěťovými hladinami.
3. Identifikujte kritické časové a prostorové oblasti spínacího pochodu v závislosti na vypínaném obvodu.
4. Prozkoumejte trendy ve vývoji technologií vypínačů a stanovte možnosti navazující práce.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Vajnar**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

# Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na vypínací schopnost výkonových vypínačů s pohledu vypínacích charakteristik. Úvodní část práce obsahuje teoretický rozbor spínacího oblouku, výkonových vypínačů a spínací děj. Druhá část práce se věnuje popisu vypínacích charakteristik vypínačů a jejich ovlivnění zhašecí komorou z prostorového hlediska a časového na základě jednotlivých intervalů spínacího děje a sítě.

## Klíčová slova

vypínače, vypínací charakteristika, zhašecí komora, zotavené napětí, průrazné napětí, plyn SF6

# Abstract

Kopačka, Pavel. *Study of breaking capability of circuit breakers at various voltage levels* [*Studie vypínací schopnosti vypínačů vn/zvn*]. Pilsen, 2016. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Vladimír Vajnar

---

Bachelor thesis is focused on the breaking capacity of circuit breakers focused on tripping characteristics. In the first part is contained a theoretical analysis of switching arc, circuit breakers and switching process. The second part is focused on the tripping characteristics description of circuit breakers influenced by quenching chamber based on time intervals of swiching process and electricity network.

## Keywords

circuit breaker, tripping characteristic, quenching chamber, recovery voltage, breakdown voltage, gas SF6

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1. června 2016

Pavel Kopačka

.....

Podpis

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Ing. Vladimíru Vajnarovi za cenné rady při zpracování této práce.

# Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Teorie elektrického oblouku (spínacího)</b>	<b>2</b>
2.1 Statický oblouk . . . . .	4
2.2 Dynamický oblouk . . . . .	6
2.3 Modely elektrického oblouku - dynamického . . . . .	7
2.3.1 Cassieho model oblouku . . . . .	8
2.3.2 Mayrovo model oblouku . . . . .	9
2.3.3 Black-Box model . . . . .	10
<b>3 Teorie spínacích přístrojů–vypínačů vn/zvn</b>	<b>11</b>
3.1 Rozdělení vypínačů . . . . .	11
3.1.1 Máloolejové vypínače . . . . .	12
3.1.2 Vakuové vypínače . . . . .	14
3.1.3 Tlakovzdušné vypínače . . . . .	16
3.1.4 Tlakoplynové vypínače $SF_6$ . . . . .	18
3.2 Historický vývoj vypínačů . . . . .	21
<b>4 Spínací děje–časový a prostorový rozbor</b>	<b>23</b>
4.1 Silnoprůdový interval . . . . .	24
4.2 Interakční interval . . . . .	25
4.3 Dielektrický interval . . . . .	25
4.4 Limitní strmlost zotaveného napětí . . . . .	26
<b>5 Vypínací schopnost vypínače–zhášecí komora, tlak plynu</b>	<b>28</b>
5.1 Druh proudění . . . . .	28
5.1.1 Izolační zhášecí tryska . . . . .	29
5.2 Tlak plynu . . . . .	30



<b>6</b>	<b>Charakteristiky vypínací schopnosti vypínače</b>	<b>32</b>
6.1	Interakční interval - vypínací charakteristika . . . . .	32
6.2	Dielektrický interval - vypínací charakteristika . . . . .	34
6.3	Charakteristika vypínací schopnosti . . . . .	34
6.4	Limitní charakteristika vypínací schopnosti v síti . . . . .	35
6.5	Charakteristika vypínací schopnosti vypínače . . . . .	37
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>39</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>40</b>
	<b>Rejstřík</b>	<b>40</b>

# Seznam obrázků

2.1	Rozložení napětí na oblouku . . . . .	3
2.2	Průběh napětí na oblouku střídavého proudu. a) <i>při intenzivní de-ionizaci</i> b) <i>při slabé de-ionizaci</i>  Převzato z [5]  . . . . .	4
2.3	Zjednodušený model oblouku a jeho základní parametry . . . . .	4
2.4	Statické charakteristiky oblouku zhašeného v zhášecí komoře při tlaku plynu 5[Mpa], 3[Mpa] a 1[Mpa]  Převzato z [2]  . . . . .	5
2.5	Průběh odezvy vodivosti $G$ a napětí oblouku $U$ při skokové změně proudu $I$  Převzato z [3]  . . . . .	6
3.1	Řez pólem vypínače 110kV  Převzato z [2]  . . . . .	13
3.2	Elektrická pevnost ve vakuu a vzduchu závislá na vzdálenosti kontaktů  Převzato z [7]  . . . . .	14
3.3	Řez zhášedlem vakuového vypínače  Převzato z [3]  . . . . .	15
3.4	Paschenovy křivky pro různé plyny . . . . .	17
3.5	Uspořádání tlakovzdušného vypínače s kapacitním děličem VVR 400 Škoda Plzeň, 420 kV, 2000 A, 36 kA  Převzato z [7]  . . . . .	17
3.6	Stavový diagram čistého $SF_6$  Převzato z [3]  . . . . .	18
3.7	Porovnání elektrických pevnosti plynu $SF_6$ , trafoleje a $N_2$  Převzato z [3]  . . . . .	19
3.8	Tepelná vodivost dusíku $N_2$ a fluoridu sírového $SF_6$ v závislosti na teplotě  Převzato z [3]  . . . . .	20
3.9	Řez jednotlakovou zhášecí komorou vypínače $SF_6$ v různých vypínacích polohách. a) zapnutý stav, b) stlačování plynu, c) proudění plynu-vypínání, d) vypnutý stav  Převzato z [2]  . . . . .	21
3.10	Nárůst vypínací schopnosti vypínačů $SF_6$  Převzato z [4]  . . . . .	22
4.1	Základní intervaly vypínacího procesu  Převzato z [2]  . . . . .	24
5.1	Schématické uspořádání zhášecí komory tlakovzdušného vypínače [Převzato z [3]], 1-zhášecí tryska; 2-tlaková izolační nádoba; 3-kontakt; $D_t$ -průměr zhášecí trysky; $z_k$ -zdvih kontaktů; $l_a$ -délka oblouku; $l_{a1}$ -charakteristická délka oblouku . . . . .	29

6.1	Závislost strmosti zotaveného napětí na vypínaném proudu (záporným)  Převzato z [1]  . . . . .	33
6.2	Závislost průrazného napětí na strmosti růstu zotaveného napětí  Převzato z [1]	34
6.3	Charakteristika vypínací schopnosti (logaritmické souřadnice)  Převzato z [1]	35
6.4	Průběhy zotaveného napětí pro svorkový zkrat  Převzato z [1]  . . . . .	36
6.5	Limitní charakteristiky s třemi charakteristickými proudy v určených intervalech [Převzato z [1]] . . . . .	37
6.6	Charakteristika vypínací schopnosti překlad pro vypínač VSV 123.3 ( $I_{VN} = 40[kA]$ , $U_N = 123[kV]$ )  Převzato z [1]  . . . . .	38

# Seznam symbolů a zkratek

$E$ .....	intenzita elektrického pole
$G$ .....	vodivost
$i_a, I_a$ .....	proud el. oblouku
$I_v$ .....	vypínací proud
$l_a$ .....	délka oblouku
$P_a$ .....	ztráty na oblouku vlivem odvodu tepla
$Q$ .....	tepelný obsah oblouku
$S_{lim}$ .....	limitní strmost zotaveného napětí
$SF_6$ .....	Fluorid sírový
$T$ .....	teplota
$\tau$ .....	časová konstanta
$u_a$ .....	napětí el. oblouku v neustáleném stavu
$U_{as}$ .....	napětí na oblouku v ustáleném stavu
$U_P$ .....	průrazné napětí
$U_C$ .....	vrcholová hodnota zotaveného napětí
VN .....	vysoké napětí od 1000[V] do 52[kV] včetně
VVN .....	velmi vysoké napětí od 52[kV] do méně než 300[kV]
ZVN .....	zvlášť vysoké napětí od 300[kV] do 800[kV] včetně.

# 1

## Úvod

Výkonové vypínače jsou jedno z nejdůležitějších zařízení v elektrizační soustavě. S postupem času a požadavky na větší přenášené výkony bylo vynaloženo mnoho úsilí v jejich vývoji. U vypínačů se hledí na spoustu požadavků na některé více a na některé méně. Vypínací schopnost jako jeden z nejdůležitějších požadavků na vypínač je ovlivňován velkým množstvím parametrů. Tyto parametry se vyobrazují v tzv. vypínacích charakteristikách na základě, kterých se pak vypínač volí a hodnotí.

Předmětem této práce je rozbor vypínací schopnosti od samotné teorie elektrického oblouku až po jeho zhášení. V první části práce zmiňuji teorii elektrického oblouku včetně jeho dělení a základních modelů, které oblouk popisují. Dále jsou zmíněny všechny základní druhy výkonových vypínačů dle jejich dělení a též i jejich historický vývoj. Tato práce taktéž obsahuje rozbor spínacího děje z časového tak i prostorového hlediska a to zejména z pohledu návrhu zhášecí komory pro výkonové vypínače s plynem  $SF_6$ . Zhášecí komora a děje které se v ní prohýbají během vypínání jsou zásadní pro následné stanovení charakteristiky vypínací schopnosti vypínače.

Na téma charakteristiky vypínací schopnosti vypínače je velice zanedbávaným tématem, proto považují kapitola zabývající se tímto problémem jako nejzásadnější v celé práci. Vzhledem k minimálnímu množství publikací v této problematice je tato kapitola vypracována výhradně na základě informací čerpaných z disertační práce prof. Vostrackého [1].

V závěru práce zmiňuji novinky v oblasti  $SF_6$  vypínačů a možnosti navazující práce vzhledem k tomu, že tato problematika je velice rozsáhlá a dá se dále podrobněji rozšířit.

## 2

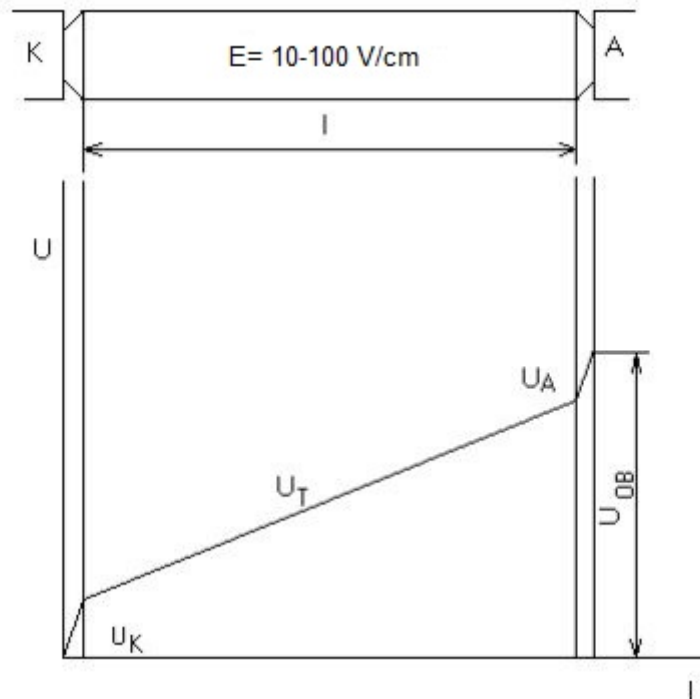
# Teorie elektrického oblouku (spínacího)

Jedná se o zářící elektrický výboj v jasně ohraničené válcové oblasti. V našem případě se setkáváme s vysokotlakým obloukem, což je oblouk hořící v plynu o atmosferickém nebo vyšším tlaku. Tento druh oblouku se vyznačuje zejména pro elektrické spínací přístroje. Základní vlastnosti oblouku hořícího v plynu lze shrnout následovně:

- a) zřetelné ohraničení mezi obloukem a okolním prostředím
- b) velká proudová hustota ( $1 \cdot 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ )
- c) malá intenzita elektrického pole ( $E_s = 10\text{-}100 \text{ V/cm}$ )
- d) vysoká teplota ionizovaného plynu (až 15000 K)
- e) malý úbytek na katodě viz. obrázek 2.1 (5-20 V)

Oblouk se skládá z jádra a obalu. Jádro obsahuje vysoce ionizovaný plyn (plazmat), který dosahuje velkých teplot jak již bylo uvedeno v základních vlastnostech. Teplota závisí intenzitě chlazení oblouku. Čím více chladíme oblouk tím zmenšujeme jeho průměr a tím pádem roste proudová hustota což má z důsledek růstu teploty (*oblouky chlazené přirozeně dosahují teplot cca 6000 K, intenzivně chlazené oblouky dosahují teplot až 15000 K*). Toto teplo způsobí velkou vodivost a dodání potřebné disociační energie, která způsobí následnou disociaci plynu. Obal jádra je tvořen žhavými plyny, které jsou z velká části disociovány. Teplota oblouku je snižována za pomoci vedení tepla a difuzí[5].

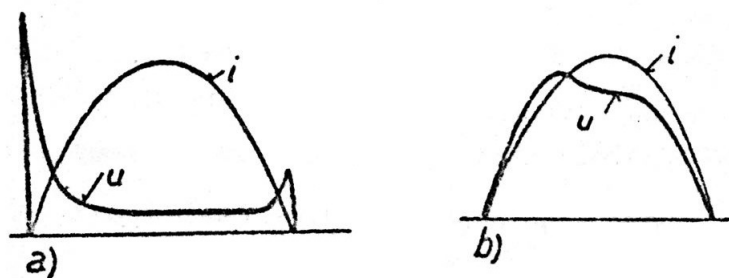
U vypínačů dochází k zapálení oblouku při jejich procesu vypínání vlivem prudkého nárůstu tepelných ztrát na kontaktech při jejich rozpojení vlivem prudkého nárůstu stykového odporu. Tím pádem dochází k odpařování kontaktního materiálu což snižuje elektrickou pevnost plynu mezi kontakty a vzniká vodivé prostředí. Kde už snadno dojde k přeskoku a vznícení oblouku[6].



Obr. 2.1: Rozložení napětí na oblouku

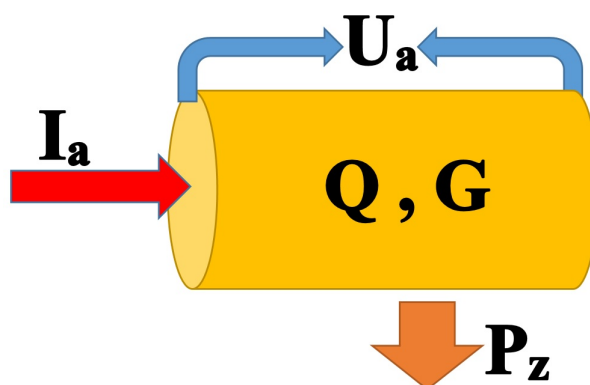
Oblouk se v obvodu chová jako vysoce nelineární prvek (odpor), proto je za potření rozdělovat oblouky dle časových charakteristik na **stacionární a nestacionární (dynamický)**. Nadále je také potřeba brát, že záleží i na **prostředí** v kterém oblouk hoří. V případě hoření oblouku v proudu plynu nebo kapaliny (tzn. v případě ochlazování) se mění průměr oblouku stejně s velikostí procházejícího proudu. Jestli že projde proud nulou je oblouk tak tenký, že může dojít k jeho zasnutí na velmi krátkou dobu (mikrosekundy), poté dojde k jeho opětovnému zapálení. V tomto případě jeho definitivní uhašení ovlivníme rychlostí de-ionizace plynu mezi kontakty a rychlostí zotavení napětí mezi kontakty čímž se budeme zabývat v dalších kapitolách. Zcela odlišně se chová oblouk v prostředí klidného vzduchu, kde se průměr oblouku téměř nemění vlivem jeho velké tepelné setrvačnosti. Tím pádem mění proud tvar stejně jako kdyby procházel kovovým vodičem čehož je důsledek, že při průchodu nulou nedojde ani k chvilkovému uhašení oblouku[5]. Na obrázku 2.2 jsou vyobrazené průběhy napětí při výše uvedených stavech.

Jak již bylo výše uvedeno tak elektrický oblouk v obvodu se chová jako nelineární prvek čímž tedy ovlivňuje proud a úbytky napětí v obvodu. Tedy oblouk, kde nejsou vyhodnocovány přechodné děje můžeme popsat  $V-A$  charakteristikou hyperbolického charakteru, jedná se zde tedy o statický oblouk[3]. Této problematice se budeme více věnovat v následujících kapitolách 2.1. Nás především bude zajímat dynamický oblouk, který lze popsat fyzikálními modely oblouku a následně i matematickými modely viz. kap. 2.2. Elektrický oblouk je možné také popsat zjednodušeným modelem na základě kterého se dělá fyzikální rozbor oblouku. Model oblouk je vyobrazen na obrázku 2.3, kde:



**Obr. 2.2:** Průběh napětí na oblouku střídavého proudu. a) při intenzivní de-ionizaci b) při slabé de-ionizaci [Převzato z [5]]

- $I_a$  - proud obloukem
- $U_a$  - napětí na oblouku
- $P_a$  - ztráty na oblouku vlivem odvodu tepla
- $Q$  - tepelný obsah oblouku
- $G$  - vodivost oblouku



**Obr. 2.3:** Zjednodušený model oblouku a jeho základní parametry

## 2.1 Statický oblouk

Se statickým obloukem se běžně nesetkáme jelikož se jedná o ustálený stav kde základní parametry uvedené na obrázku 2.3 nemění. Tento stav se velice těžko realizuje jeho výskyt je pouze plazmatronů a to jen přibližný. Jelikož příkon oblouku je vlivem stacionárního stavu roven jeho ztrátám tak máme možnost popsat oblouk statickou charakteristikou jako funkci napětí a proudu.



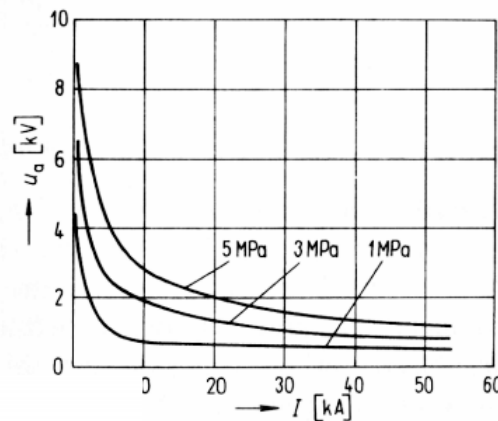
Přičemž na základě měření byla vyjádřena tato závislost napětí oblouku na proudu (*V-A charakteristika*) rovnicí **Ayrtonové**:

$$U_a = a + b \cdot l_a + \frac{c + d \cdot l_a}{I} \tag{2.1}$$

Jelikož ve výše uvedené rovnici (2.1) jsou písmena a, b, c, d konstanty závislé především na rozměrech elektrod, druhu a tlaku plynu a  $l_a$  značí délku oblouku, lze Ayrtonové rovnici vyjádřit v upraveném zkráceném tvaru:

$$U_a \cdot I^\alpha = \text{konstanta} \tag{2.2}$$

Konstanta  $\alpha$  může nabývat hodnot od 0,08 až do 0,66 (*extrémně i 1*) tyto hodnoty jsou ovlivněny tlaky v zhašecí komoře a samotnou její konstrukcí. Statickou V-A charakteristiku tedy popisuje rovnice hyperboly jak už bylo dříve uvedeno z čehož je patrné že obloukové napětí je nepřímo úměrné proudu. Na obrázku 2.4 jsou znázorněny statické charakteristiky pro různé tlaky plynu.



**Obr. 2.4:** Statické charakteristiky oblouku zhašeného v zhašecí komoře při tlaku plynu 5[Mpa], 3[Mpa] a 1[Mpa] |Převzato z [2]|

Z pohledu energetické bilance statického oblouku jsou ztráty vznikající na oblouku odváděly *prouděním, sálaní, vedením, expanzí a difuzí*. Tento děj je popsán **Elenbaasovou-Hellerovou** rovnicí. Přičemž tato rovnice vychází z rovnice činného výkonu (2.3) kde se výkon rovná ztrátám vedení tepla, proudění a sálaní ostatní zanedbáváme.

$$U_a I = P_{Zproudnm} + P_{Zvednm} + P_{Zslnm} \tag{2.3}$$

Elenbaasova-Hellerova rovnice:

$$\sigma \cdot E^2 = \rho \cdot J^2 = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + c_p \cdot m_v \cdot v \cdot \text{grad}T + s_{sal}(T) \tag{2.4}$$

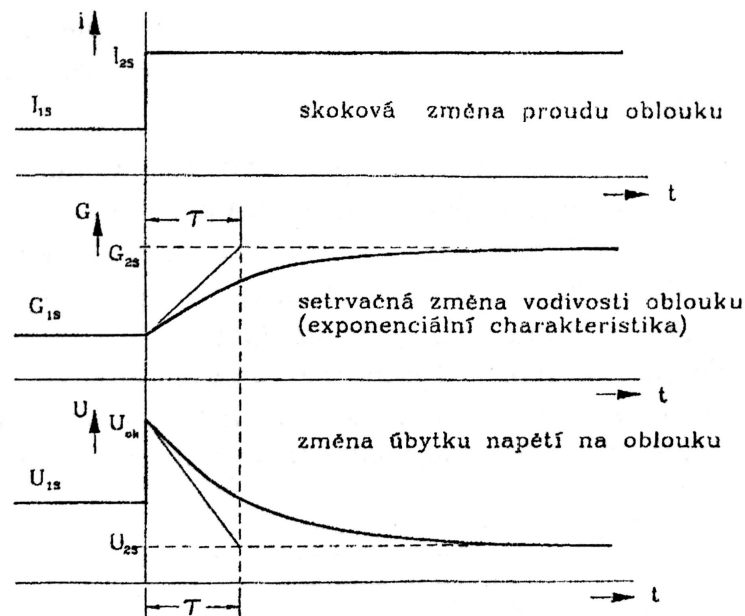
kde:  $\sigma$  - měrná vodivost el. sloupce oblouku;  $\rho$  - rezistivita sloupce oblouku;  $E$  - gradient napětí na sloupci oblouku;  $J$  - proudová hustota sloupce oblouku;  $\lambda$  měrná tepelná vodivost sloupce oblouku;  $c_p$  - měrné teplo při stálém tlaku;  $m_v$  - objemová hustota sloupce

oblouku;  $v$  - rychlost proudění plazmatu;  $T$  - teplota;  $s_{sal}(T)$  - měrný vyzářený výkon [2, 3, 4].

## 2.2 Dynamický oblouk

S dynamickým obloukem se setkáme ve střídavých obvodech, jedná se tedy o oblouk ve kterém dochází k rychlé změně parametrů (*proudu, teploty, délky apod. . .*) v čase. Hořící oblouk je tvořen hořícím sloupcem, který dosahuje vysokých teplot v řádech tisíců kelvinů. Vlivem tepelného obsahu sloupce se nemění teplota oblouku skokově stejně s proudem, ale probíhá setrvačné což ovlivňuje vodivost oblouku a úbytek napětí. Vlivem tohoto děje nelze tedy popsat dynamický oblouk statickou V-A charakteristikou. V případě rychlých časových změn proudu lze porovnat tepelnou setrvačnost oblouku s napěťovou hysterezi, která vzniká na oblouku.

Výše zmíněná tepelná setrvačnost (změna vodivosti) je udávána časovou konstantou  $\tau$ , která charakterizuje rychlost **exponenciální změny** vodivosti (*též i napětí*) při skokové změně proudu. Uvedený děj je vyobrazen na obrázku 2.5 .



**Obr. 2.5:** Průběh odezvy vodivosti  $G$  a napětí oblouku  $U$  při skokové změně proudu  $I$   
 [Převzato z [3]]

Z rovnice energetické bilance dynamického oblouku, která rozděluje výkon dodávaný oblouku na ztráty v oblouku  $\Delta P$  a na změnu tepelného obsahu  $dQ/dt$ , je možno určit časovou konstanta.

$$u_a \cdot i = \frac{dQ}{dt} + \Delta P \tag{2.5}$$

Přičemž tato rovnice je nejpodstatněji rovnicí pro zkoumání dynamického spínacího oblouku a vychází z ní fyzikální modely oblouku. Jak již bylo uvedeno časová konstanta je

zřejmá z této základní rovnice a je to tedy *poměrná hodnota tepelného obsahu a odvedeného výkonu z oblouku*:

$$\tau = \frac{Q}{P} \quad (2.6)$$

Tento vztah ovšem neplatí na celém rozmezí proudů. Jelikož uvedené veličiny jsou nelineárně závislé na teplotě oblouku. Časová konstanta lze také určit z *odezvy obloukového napětí na skokovou změnu proudu*, kde vycházíme rovnice pro časovou změnu vodivosti  $G$ :

$$G = G_{s2} + (G_{s1} - G_{s2}) \cdot e^{-t/\tau} \quad (2.7)$$

kde vodivosti  $G_{s1}$ - $G_{s2}$  jsou uvažovány jako konstanty. Reálně jsou vodivosti oblouku omezeny proudovým rozmezím a konkrétním uspořádáním zhašecí komory.

Přičemž při použití metody určení časové konstanty z odezvy obloukového napětí na skokovou změnu proudu uvažujeme počáteční ustálené hodnoty proudu  $I_{s1}$  a obloukového napětí  $U_{s1}$  a konečné ustálené hodnoty  $I_{s2}$  a  $U_{s2}$  jak je znázorněno na obr. 2.5. Pro představu časová konstanta ve volně hořícím prostředí o různém plynu při proudu  $I=1[A]$  je uvedena v tab. 2.1

Plyn	$\tau[\mu s]$
$SF_6$	0,8
$N_2$	210
<i>vzduch</i>	80
$O_2$	1,5

**Tab. 2.1:** Časové konstanty oblouků při  $I=1[A]$  volně hořících v různém plynu.

## 2.3 Modely elektrického oblouku - dynamického

Teoretické modely oblouku jsou v podstatě teoretické zpracování vypínacího dynamického oblouku. Těchto teorií bylo zpracováno mnoho, ale většina z nich vychází ze dvou základní teorií *Mayrovy a Cassieho*. Teorie se liší převážně v uvažovaných zjednodušujících předpokladech. Modely se dělí do dvou základních skupin, které se dělí z hlediska pohledu na samotný elektrický oblouk na modely:

- **S popisem fyzikálních procesů**
- **Black-Box model** (tzv. *matematický model*)

První z uvedených druhů modelu se zabývá stavy, které se dějí na základě fyzikálních jevů (*tepelné setrvačnosti atd. . .*). Co se týče druhého druhu modelu tak ten vychází z modifikace fyzikálního druhu a určuje se pro konkrétních vypínač na základě vstupních hodnot získaných experimentální cestou. Nejpřesnější popis celého oblouku zajišťuje *Cassieho* -

*Mayrův* model a kybernetické modely, které většinou vychází z Mayrovo modelu. Dalšími používanými modely jsou modely: *definovaný V-A charakteristikou*, *definovaný obloukovým napětím*. V další části kapitoly se zaměříme na popis základních modelů *Cassieho a Mayra*[1, 2, 3, 4].

### 2.3.1 Cassieho model oblouku

Vyjádření toho modelu oblouku vychází z **rovnice energetické bilance dynamického oblouku** (2.5). Abychom mohli řešit tento model oblouku na základě zmíněné rovnice musíme předpokládat tvar oblouku a určité základní předpoklady, které nám umožní řešit tento model.

Uvažujeme tyto základní zjednodušující předpoklady:

1.  $\Delta P$  jsou pouze tepelné ztráty prouděním.
2. Teplota oblouku je konstantní  $T$ , z čehož vyplývá konstantní elektrická měrná vodivost  $\gamma$  a měrný tepelný obsah  $q$ .
3. Konstantní napětí  $U_{as}$
4. Tvar oblouku je válcovitého tělesa s poloměrem  $r$ , který je úměrný proudu.

Výše uvedené předpoklady jsou vyhovující pro popis chování oblouku v okolí maximálních proudových hodnot, tedy kdy máme téměř konstantní napětí oblouku a průměr nabývá velkých hodnot. Z hořícího oblouku je zda uplatněno odvedení ztrát prouděním z jeho celkového povrchu. Tyto podmínky jsou tedy specifické pouze pro určitý časový interval oblouku na základě čehož jim vyhovuje pouze **silnoprůdný interval** (viz kap. 4)[2].

Po zohlednění všech předpokladů můžeme tedy pro válcový oblouk psát následující vztahy pro vodivost  $G$ , ztráty  $P$  a tepelný obsah  $Q$ :

$$G = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma \quad (2.8)$$

$$P = \pi \cdot r^2 \cdot v \quad (2.9)$$

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot q \quad (2.10)$$

Postupnými úpravami výše uvedených rovnic dostaneme:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{q}{\gamma} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (2.11)$$

tento vztah dosadíme do rovnice energetické bilance sloupce oblouku (2.5) a po řadě úprav pro stacionární stav dojdeme k výsledné **Cassieho rovnici**:

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left[ \left( \frac{u_a}{U_{as}} \right)^2 - 1 \right] \quad (2.12)$$

Rovnice je převzata z publikace [3], kde se vyskytuje podrobné odvození této rovnice (2.12). Proud a ztráty oblouku jsou zahrnuty v časové konstantě:

$$\tau = \frac{q}{\Delta p} \quad (2.13)$$

Napětí  $U_{as}$  je napětí které vzniká na oblouku v ustáleném stavu a  $u_a$  je napětí v přechodném stavu. Při změně stacionárního stavu se mění vodivost  $G$  a napětí  $u_a$  dle výše uvedené rovnice (2.12). Nový ustálený stacionární stav se vyznačuje stejným napětím  $U_{as}$  a změněným poloměrem oblouku  $r$  z čehož vyplývá změna vodivosti  $G$ , tepelného obsahu  $Q$  a ztrát  $P$  což je patrné z rovnic (2.8, 2.9, 2.10) [3].

### 2.3.2 Mayrovo model oblouku

Tento model taktéž jak Cassieho model vychází z rovnice energetické bilance dynamického oblouku. Přičemž rozdíl zde je v uvažovaných základních zjednodušujících předpokladech. V tomto případě uvažujeme následující předpoklady:

1. Poloměr oblouku  $r$  uvažujeme konstantní ( $r = konstata$ )
2. Ztráty  $P$  prouděním zanedbáváme, jelikož uvažujeme tenký oblouk (velmi malé  $r$ )
3. Vodivost  $G$  odpovídá vztahu:

$$G = konst. \cdot e^{Q/Q_0} \quad (2.14)$$

kde  $Q_0$  je tepenné množství, při jehož dodání se zvětší vodivost oblouku v poměru  $e : 1$ .

4. Ztráty vedením tepla jsou na základě Mayrova předpokladu konstantní. Předpokládá se tedy konstantní V-A charakteristika oblouk  $U_{as} \cdot I_s = konst.$

Zmíněné předpoklady jsou podrobněji odvozeny v publikaci [2]. Pro odvození výsledné Mayrovi rovnice se využívá rovnice (2.14) z předpokladu o vodivosti oblouku. Rovnice se zlogaritmuje a poté proběhne úprava derivováním čímž dostaneme vztah:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0 \cdot \frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (2.15)$$

Uvedený vztah dosadíme obdobně jak u Cassieho modelu do rovnice energetické bilance dynamického oblouku (2.5) a pomocí několika úprav dostaneme výslednou rovnici určující V-A charakteristiku, která vystihuje chování el. oblouku dle Mayra.

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left( \frac{u_a \cdot i}{\Delta P} - 1 \right) \quad (2.16)$$

Odvození této rovnice se nachází v publikaci [3]. Časová konstanta obsažena ve výsledné rovnici je dána tímto vztahem:

$$\tau = \frac{Q_s}{\Delta P} \quad (2.17)$$

kde se  $Q_s$  a  $\Delta P$  považují jako konstanty dle předpokladů Mayra. Dalším předpokladem je konstantní  $r$  (poloměr) jak již bylo zmíněno.

Mayrova rovnice (2.16) se formálně podobá Cassieho rovnici (2.12), ale fyzikálně jsou odlišné jelikož Cassie předpokládal konstantní  $u_a$  a ztráty proměnné dle proměnného poloměru oblouku což vystihuje **silnoproudý interval**. Přičemž v Mayerovo rovnici rozhoduje znaménko v závorce o vypnutí, které je podmíněno výkonem obvodu  $P = u_a \cdot i$ , který by měl být menší než ztráty oblouku  $\Delta P$ . Mayerův model je tedy vhodnější pro **interakční interval**, který rozhoduje o vypnutí. Pro celkový popis oblouku se využívá obou rovnic jak Mayrovo tak Cassieho.

### 2.3.3 Black-Box model

Tento typ modelu vychází z modifikace Mayrovy rovnice a od klasických teorií dynamického oblouku liší v celkovém pohledu na věc. Klasické teorie popisovaly oblouk v závislosti na časové konstantě, charakterizující tepelnou setrvačnost. Reálně je časová konstanta proměnou veličinou, která je ovlivněna rozměry, teplotou a intenzitou chlazení oblouku. Nadále je ovlivněna tedy vlastnostmi plynu a též i geometrií zhášecí komory. Na základě těchto faktorů je tedy časovou konstantu problematické určit výpočtem.

Časová konstanta je tedy stanovitelná i na základě vyhodnocení experimentů, kde měříme proud a napětí v interakčním intervalu ve velkém časovém intervalu ( $\mu s$ ). Získáváme tedy závislosti, které respektují konkrétní zhášecí komoru. Hodnoty získané experimentem využíváme jako vstupní parametry do Black-Box modelu. Výstupní charakteristiky z tohoto typu modelu jsou definovány závislostí časové konstanty a odváděného výkonu z oblouku. Na základě čehož se tyto modely nazývají též jako  $P - \tau$  modely. Těchto modelů je mnoho druhů jelikož jsou vytvářeny na konkrétní vypínače.

Black box modely jsou vhodné k posuzování vypínací schopnost hlavně ve zkratových obvodech. Výsledky jsou závislé na vstupních parametrech zjištěných experimentálně. Tyto modely jsou přenosem pro získání charakteristik respektujících vlivů parametru obvodu. Můžeme tak věrohodně stanovit mezní parametry vypínače a též porovnávat vlastnosti vypínači v daných obvodech[2].

# 3

## Teorie spínacích přístrojů–vypínačů vn/zvn

Spínací přístroje jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy. Tyto přístroje rozdělujeme do několika skupin dle jejich spínací schopnosti: spínače s plnou schopností spínání (*vypínače*), omezenou schopností spínání (*odpínače*) a spínače bez schopnosti spínání (*odpojovače apod. . .*). V této práci se zaměříme především na vypínače vn a zvn, které jsou v soustavách vvn a zvn jedním z nejdůležitějších přístrojů.

Vypínače mají plnou schopnost spínání jak již bylo uvedeno výše. Tím se rozumí, že vypínače mohou spínat (tzn. vypínat a zapínat) provozní i poruchové stavy s nejrůznějšími charakteristikami. Během vypínání obvodů, kterými protéká proud dochází při rozpojování kontaktů vypínače ke vzniku elektrického oblouku. Oblouk se není schopen samovolně přerušit a je třeba ho přerušit uměle v zhášecí komoře vypínače zhášecím médiem. Technologie zhášení (zhášecí médium) je jedno z hlavních kritérií dělení vypínačů.

Při volbě vypínače se klade zřetel na následující charakteristické vlastnosti: *provozní napětí, provozní proud, izolační hladinu, vypínací proud, zotavené napětí, zapínací proud, vypínací proud nezátíženého vedení apod. . .*, které jsou do značné míry ovlivněny systémem zhášení[3].

### 3.1 Rozdělení vypínačů

U vypínačů je známo mnoho kritérií dle, kterých je rozdělujeme. Jedny z nejznámějších jsou následující kritéria:

- Napětí
- **Technologie zhášení (zhášecího média)**
- Zhášecí energie
- Místa určení

Dělení dle **technologie zhášení** je nejznámější a patří do něj následující druhy vypínačů:

- Olejové vypínače (kotlové)
- Máloolejové vypínače
- Vodní vypínače (expanzní vypínač)
- Tlakovzdušné vypínače
- Tlakoplynové vypínače (zejména s SF6 plynem)
- Magnetický vypínač (stejnoseměrné sítě)
- Vakuový vypínač

Z historického pohledu jsou v současné době střetem zájmu na hladinách VN, VVN a ZVN tlakoplynové vypínače s plynem SF6 a vakuové pro nižší napěťové hladiny vn. Máloolejové vypínače jsou na postupném útlumu a s ostatními (*olejový, vodní a tlakovzdušný vypínače*) už se v současné době téměř nesetkáme.

### 3.1.1 Máloolejové vypínače

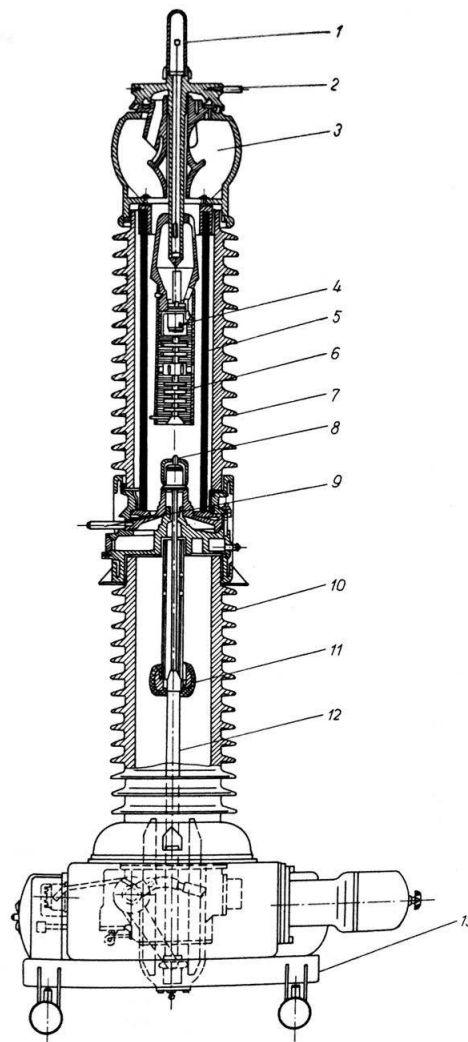
Jak již z názvu vyplývá tak tento vypínač pracuje na principu zhášení oblouku v malém množství oleje. Pochod zhášení je obdobný jak u klasických olejových (*kotlových*) vypínačů, ale zhašení probíhá v zhášecích komorách, které mají mnoho modifikací řešení. Vypínače jsou konstruovány pro hladiny VN a VVN. Základní konstrukční uspořádání vypínače je na všech hladinách obdobné jen pro jmenovité napětí 200[kV] a více je řazeno ve vypínači více sériově spojených zhášedel.

Tento typ vypínače má dobrou vypínací schopnost vypínání blízkých zkratů. Tato schopnost vyplývá z malé závislosti vypínací schopnosti na strmosti zotaveného napětí. Obsah malého množství oleje umožňuje jednoduší zásobování rozveden novým olejem, snažší údržbu a manipulaci s vypínači. Zmíněná fakta zapříčiňují vyšší provozní a bezpečnostní spolehlivost. Jednou z poměrně zásadních nevýhod tohoto vypínače je jeho poměrně znatelná závislost zdvihu kontaktu na jmenovitém napětí:

- 60[kV] zdvih 300[mm]
- 130[kV] zdvih 780[mm]
- 220[kV] zdvih 1500[mm]

Výše uvedené příklady závislosti byli určeny experimentálně u komory máloolejového vypínače s axiálním chlazením. Tato nevýhoda je způsobena z důvodu působení el. oblouku na olej a jeho následný rozklad. Olej se znečišťuje sazími z rozkladu a snižuje přeskokovou





Obr. 3.1: Řez pólem vypínače 110kV [Převzato z [2]]

dielektrickou pevnost mezi kontakty. Aby byla dosažena dostatečná dielektrické pevnosti je třeba aby pohyblivý kontakt (roubík) opustil zhášecí komoru.

**Základní popis máloolejového jednopólového vypínače vyobrazeného na obr. 3.1:** 1 olejznak; 2, 9 přívodí svorníky; 3 výfukový prostor; 4 pevný kontakt; 5 izolační válec; 6 zhášecí komora; 7 průchodkový izolátor; 8 pohyblivý kontakt; 10 podpěrný izolátor; 11 vyzařovací hlavice; 12 izolační táhlo; 13 podvozek s pneumatickým pohonem[2].

Samotná zhášecí komora vypínače má mnoho modifikací jak již bylo zmíněno dříve. Ze všech modifikací je třeba zmínit tři základní:

- **Pružná zhášecí komora** s postupným oddalováním kontaktů otevírá roubík dílčí dutiny komory, což zapříčiní přetlak a vznik mezer v mezi jednotlivými segmenty tzv. pružné komory a dojde k následovnému proudění plynu ve vzniklých mezerách.
- **Pevná zhášecí komora se skokovou změnou tlaku** vlivem otevření radiálních otvorů u uprostřed komory

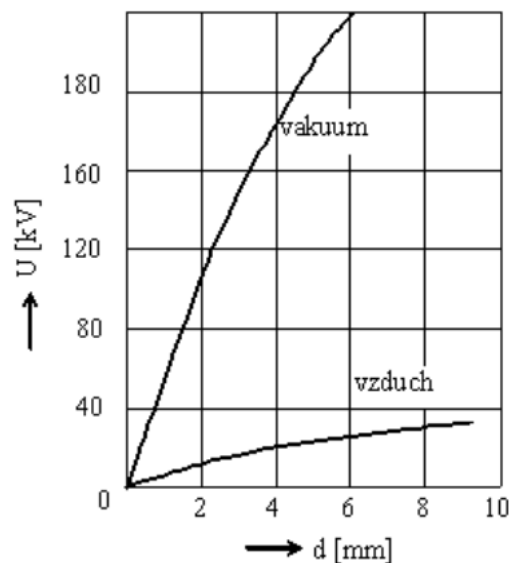
- **Pevná zhášecí komora s dodatečným efektem** (*nuceným prouděním*) příčného proudění chladného oleje mezi kontakty.

Tento typ vypínače byl jedním z nejrozšířenějších vypínačů vůbec na hladinách VN a VVN. V současné době je nahrazován modernějšími vypínači (*Vakuovými a SF6 vypínači*), ale stále se nimi můžeme setkat zejména v koncových rozvodnách.

### 3.1.2 Vakuové vypínače

Jedná se o moderní typ vypínače, který pracuje na principu zhášení el. oblouku ve vakuu. Vypínače jsou dostupný pouze na napěťové hladině VN do cca 40,5[kV]<sup>1</sup>. Toto značné napěťové omezení je způsobeno jednak technologickou a finanční náročností výrobního procesu a nevhodností řazení zhášedel do série[3].

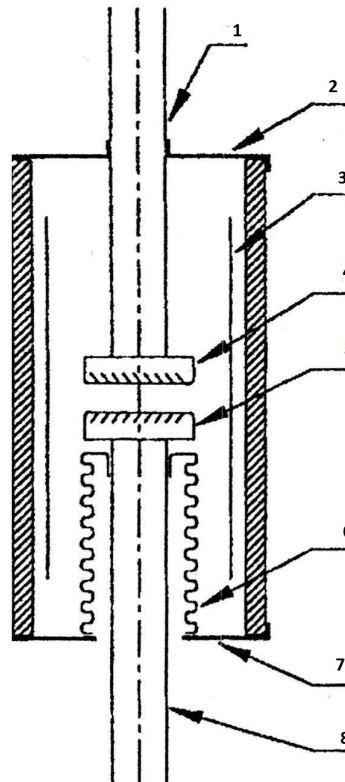
Jelikož prohýbá hoření el. oblouku ve vakuu. Tak je zde třeba značně řešit vakuovou těsnost veškerých použitých konstrukčních materiálů a technologicky postup včetně materiálu použitého při výrobě kontaktů. Samotné kontakty jsou jednou z klíčových součástí vypínače, při jejich výrobě se využívá kompozitních vícesložkových materiálů s převážně měděným Cu základem (*CuBi, WCu, WCAg, MoCu a hlavně CuCr*), které dosahují větší teplotní odolnosti kontaktů což zamezuje jejich svařování a případnému deformování vlivem vysokých teplot i bez působení el. oblouku. Výhodou těchto vypínačů je vzhledem



**Obr. 3.2:** Elektrická pevnost ve vakuu a vzduchu závislá na vzdálenosti kontaktů [Převzato z [7]]

k jejich konstrukci možnost jejich využití v extrémních provozech, jelikož jsou nehořlavé, nevýbušné a neovlivňují okolní prostředí, kterým nejsou těž ovlivněny. Další z předností je vysoká elektrická pevnost vakua (*teoreticky 100[kV/mm], prakticky 10[kV/mm]*). Takto vysoká pevnost nám umožňuje malý zdvih kontaktů což je patrné z obr. 3.2. Vzhledem malému zdvihu kontaktů není potřeba složitého pohonného mechanismu[7].

<sup>1</sup>Vakuový vypínač pro jmenovité napětí 40,5[kV] vyrábí firma ABB s označením VB4



Obr. 3.3: Řez zhášedlem vakuového vypínače [Převzato z [3]]

**Základní popis zhášedla vakuového vypínače obr. 3.3:** 1 držák pevného kontaktu; 2, 7 víko; 3 stínění; 4 pevný kontakt; 5 pohyblivý kontakt; 6 vlnovec; 8 táhlo pohyblivého kontaktu. Stínítko zamezuje usazování kovových par na povrch izolačních stěn komory, které vznikají při odpařování z kontaktů během vypínacího procesu.

Oblouk mezi kontakty je vlivem krátké vzdálenosti zkoncentrovaný a obsahuje plazmat o vysokých teplotách. Délka oblouku též ovlivňuje úbytek napětí na oblouku, který nabývá nízkých hodnot **10-30[V]**. Během hoření oblouku dochází mezi kontakty ke složitým pochodům což má za následek, že při klesání proudu k nule se stává oblouk nestabilním a uhasíná. Čímž dochází k tzv. utržení oblouku vlivem čehož vypínač způsobuje nevhodná přepětí. Těmto nežádaným dějům zamezíme vytvořením magnetického pole působícího na oblouk a vhodnou volbou materiálu pro kontakty viz. výše. K vytvoření magnetického pole se používají zvláštní druhy konstrukce kontaktů, které vytvářejí základní dva druhy pole a to dle směru působení na oblouk:

- **pole radiální** - Konstrukce kontaktů: spirálové kontakty, kontakty se šikmými zářezy, kontakty se spirálovými stínícími elektrodami
- **pole axiální** - Konstrukce kontaktů: cívka součástí kontaktu, externí cívka obklopující zhášedlo

V současnosti je věnována pozornost vývoji vakuových vypínačů po celém světě. Jejich zejména finanční náročnost na technologii výroby, zatím zabraňuje jejich rozmachu

na vyšších napěťových hladinách. Tyto vypínače jsou rovnocenným konkurentem SF6 vypínačů na napěťové hladině VN do 40,5[kV][3, 7].

### 3.1.3 Tlakovzdušné vypínače

Tento typ vypínače využívá k zhášení oblouku tzv. cizí zhášecí energii v podobě zatlačeného vzduchu, který je předem vyráběn pomocí kompresorů a uchováván v zásobníku tlakového vzduchu. Tento stlačený vzduch nevyužívá jen k zhášení oblouku, ale i ke všem ostatním mechanickým úkonům, které se ve vypínači dějí (*pohyb roubíku atd.*). Hodnoty tlaku vzduchu používaného v tomto systému jsou 0,5; 1,2; 1,6; 2,0; 3,2; 4,0 a 6,0 MPa.

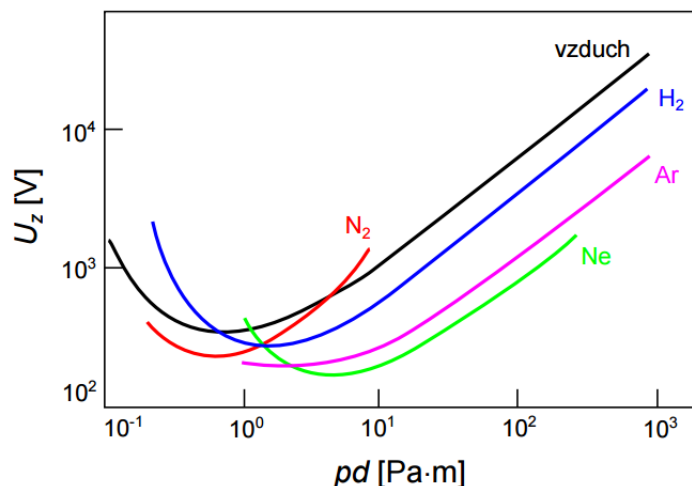
Tlakovzdušné vypínače přerušili dominanci maloolejových vypínačů na trhu a postupem vývoje měli nejdokonalejší soustavu zhášecího ústrojí a to zejména z důvodu výborných vypínacích vlastností: *vypínání velkých výkonů, rychlost chodu mechanismu, krátká a konstantní doba hoření oblouku, čistota provozu a odstranění nebezpečí požáru a výbuchu vypínače*. Tyto vypínače se konstruují pro hladiny VN a zejména hladiny VVN. Jejich nevýhodou je konstrukční složitost a ekonomická náročnost (*kompresní stanice, rozvod vzduchu atd.*). Z toho důvodu jsou používány hlavně na místech kde extrémní provozní podmínky vylučují použití jiných typů vypínačů[7].

Jelikož je mnoho provedení těchto vypínačů tak je můžeme dělit dle několika hledisek:

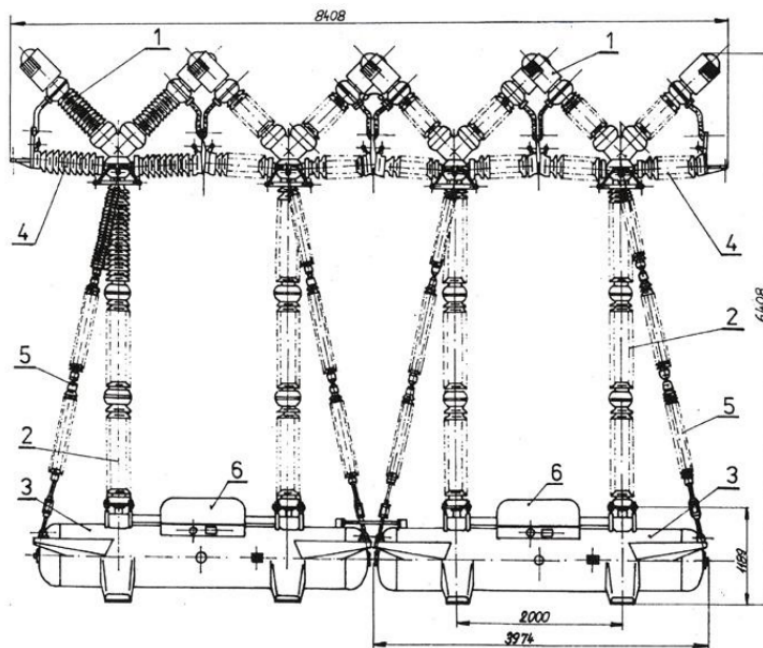
- **Provedení (tvar) zhášecí komory:** Provedení s *otevřenou zhášecí komorou*, kde proces zhášení probíhá ve volném ovzduší pomocí stlačeného vzduchu. Jedná se o tzv. *vypínače s volným obloukem*. Dalším druhem je vypínač s *uzavřenou zhášecí komorou*. U tohoto druhu probíhá zhášecí proces v uzavřené komoře, která je izolační nebo kovová (*s izolačním respektive kovovým pláštěm a průchodkou*). Tento druh tlakovzdušných vypínačů zažil největší rozmach[2].
- **Směru ofukování oblouku:** Oblouk lze ofukovat jak axiálně tak i radiálně. Přičemž axiální ochlazování oblouku má značnou spotřebu tlakového vzduchu z toho důvodu se používá jen zřídka. Při ochlazování radiálním směrem dosáhneme stejného efektu jak při axiálním ochlazování při menší spotřebě vzduchu. Což má za důsledek toho, že většina zhášedel je navrhována pro proudění podélné (radiální).
- **Druhu trysek:** Trysky jsou jednou z nejdůležitějších částí v procesu vypínání mohou být jednoduché (*dutý a plný kontakt*), nebo dvojité (*oba kontakty duté*). Jednoduché kontakty způsobují pohoršení podmínek pro zhášení oblouku vlivem strhování kovových par z kontaktu do prostoru hoření vlivem proudění vzduchu. Trysky jsou tvořeny z kovových nebo izolačních materiálů, ale ve většině případech se používají kovové, jelikož jsou méně tepelně namáhány a pomáhají chladit oblouk. Průměr a tvar trysky je dán hodnotami proudu a napětí, které bude vypínač přerušovat. S rostoucím napětím se prodlužuje tryška a s rostoucí proudem se zvětšuje průřez

hrdla. V případě nesprávného návrhu nebo vypínání vyšších proudů než pro, které je vypínači navrhnut může dojít k nežádoucímu jevu tzv. *zahlcení trysky*.

- **Tlaku vzduchu:** S růstem tlaku roste dielektrická pevnost mezi kontakty dle Paschenova zákona (obr. 3.4). Dielektrická pevnost je nadále ovlivněna rozložením el. pole, které požadujeme rovnoměrné což docílíme tvarem kontaktů. Tlak vzrůstá do 2[MPa] cca lineárně, s vyšším tlakem se růst zmenšuje. Z tohoto důvodu se nejčastěji používají vypínače s tlakem cca 2,5[MPa][5, 7].



Obr. 3.4: Paschenovy křivky pro různé plyny



Obr. 3.5: Uspořádání tlakovzdušného vypínače s kapacitním děličem VVR 400 Škoda Plzeň, 420 kV, 2000 A, 36 kA [Převzato z [7]]

### Základní popis uspořádání tlakovzdušného vypínače s kapacitním děličem obr.

**3.3:** 1 zhášecí komora; 2 podpěrný izolátor; 3 tlaková nádoba; 4 kondenzátor; 5 izolátor; 6 ovládací skříň

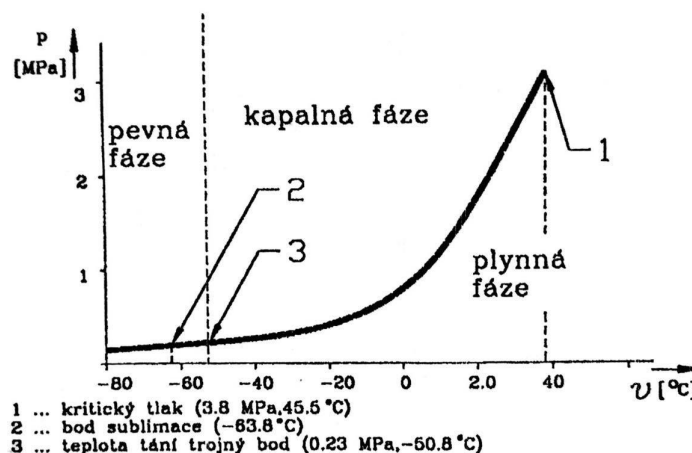
Na hladinách VN připojujeme k zhášedlu paralelně odpory, které mají vliv na strmost zotavovacího napětí a tím zamezují opětovnému zápalu oblouku. U hladin VVN se řadí až 12 zhášedel sériově a k nim paralelně kapacity. V tomto případě je hlavní dodržet stejné podmínky pro všechny zhášedla zejména oddělení všech kontaktů ve stejný čas. Kapacity docílí toho že se zotavovací napětí rozloží v poměru kapacit. Variant uspořádání jednoho pólu vypínače je mnoho proto se u každého výrobce můžeme setkat s totálně vzhledově odlišným vypínačem[5, 7].

V současné době je v provozu už jen minimální počet těchto vypínačů a nahrazují se vypínači SF<sub>6</sub>, zejména z důvodu jejich ekonomické náročnosti na výrobu a údržbu.

#### 3.1.4 Tlakoplynové vypínače SF<sub>6</sub>

Tlakoplynové vypínače zhaší elektrický oblouk v elektronegativním plynu. K používání elektronegativních plynů se přešlo z důvodu rostoucích požadavků na vypínače na hladinách VN a VVN. Bylo vyzkoušeno mnoho elektronegativních plynů, ale pro zatím se nejvíce osvědčil čistý plyn SF<sub>6</sub> (*fluorid sírový*).

**Čistý SF<sub>6</sub> plyn** se nevyskytuje v přírodě, vytváří se uměle. Charakteristickými vlastnostmi tohoto plynu jsou velká elektrická pevnost, nehořlavost, velká chemická stálost, výborné zhášecí vlastnosti a dobrým odvodem tepla. Nadále se jedná o bezbarvý, bez zápachový, nejedovatý a nedýchátný plyn. Z důvodu výše uvedených vlastností byl tento plyn vybrán a je do dnes požíván jako základ všech přístrojů VN a VVN nové generace. Plyn vzniká pomocí elektrolyzy z roztoků fluorovaných solí při teplotě lázně cca 100[°C]. Při výrobě vznikají s plynem SF<sub>6</sub> další plyny SF<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, které odstraňujeme pomocí rafinace[3, 7]. Chování plynu popisuje stavový diagram na obr. 3.6. Z kterého



Obr. 3.6: Stavový diagram čistého SF<sub>6</sub> |Převzato z [3]|

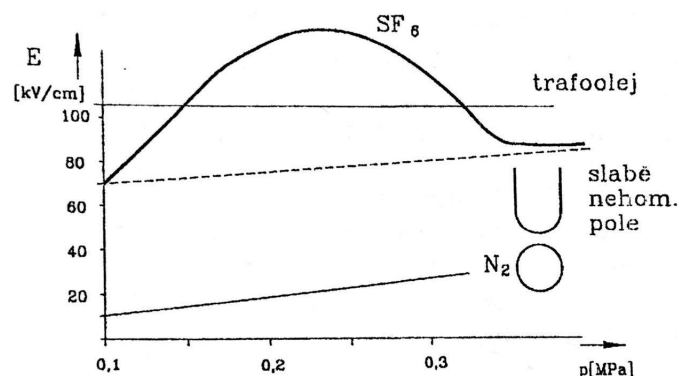
vyplývá že při 20[°C] a 1013[hPa] plyn SF<sub>6</sub> nabývá hustoty 6,164[kgm<sup>-3</sup>]. Tato hodnota

je cca 5 krát větší než je hustota vzduchu při stejné teplotě. Bod varu je  $-60[^\circ\text{C}]$  při  $1013[\text{hPa}]$ . Ke kapalnění plynu dochází při teplotě  $20[^\circ\text{C}]$  a tlaku  $2,4[\text{MPa}]$ . Tepelná vodivost ( $\lambda = 0,034[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ ) je 1,6 krát větší než je tepelná vodivost vzduchu při tlaku  $0,1[\text{MPa}]$  (při tlaku  $0,2$  dosahuje koeficient vodivosti 2,5 násobku vodivosti vzduchu). S chemického hlediska je fluorid sírový do  $150[^\circ\text{C}]$  chemicky stálý. V případě vyšších teplot se začne rozkládat na několik produktů:

- $\text{SF}_6$  - velmi dráždivý
- $\text{SF}_2$  - jedovatý
- $\text{S}_2\text{F}_2$  - zapáchající
- $\text{S}_2\text{F}_{10}$  - nebezpečný (nezapáchá, nedráždí, jedovatý)
- S, F

Plyn nabývá teplot vyšších než  $150^\circ\text{C}$  při působení elektrického oblouku. Po zhašení oblouku dojde k poklesu teploty a produkty rekombinují na původní plyn  $\text{SF}_6$  a zbytky jsou odstraněny pomocí absorbéru ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který zároveň působ jako vysoušedlo. Jelikož v případě spojení vlhkosti a zbytků produktů vzniká leptavý produkt, který leptá sklo a některé kovy

Kovové páry vznikající vlivem odpařování kontaktů v reakci s plynem tvoří tzv. kovové fluoridy, které se jeví jako bílý prášek usazující se v zhašecí komoře a také na kontaktech. Jedná se o elektrický izolující prášek. Prášek se usazuje i na kontaktech což má za příčinu nuceného tření spínacích kontaktů to ovšem nemusí vyhovovat vypínači a následné proudové cestě při sepnutých kontaktech. Proto se konstrukčně odděluje proudová dráha a opalovací kontakty (proudová dráha rozepne 1. a poté se až oddělí opalovací kontakty).

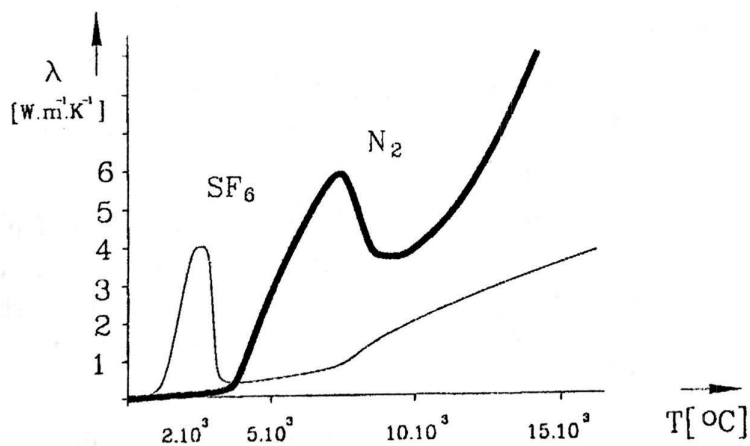


**Obr. 3.7:** Porovnání elektrických pevností plynu  $\text{SF}_6$ , trafooleje a  $\text{N}_2$  |Převzato z [3]|

Toto zhašecí má velkou výhodu v tom že prodlužuje životnost a dobu mezi revizemi vypínačů  $\text{SF}_6$ , jelikož se ve vypínači nenachází vzduch tak tam nedochází ani k oxidaci kovů. Fluorid sírový vykazuje vyšší elektrickou pevnost než vzduch při působení elektrického

pole a to zejména v nižších hodnotách přetlaku. Z obrázku 3.7 je patrná elektrická pevnost plynu  $SF_6$ , dusíku a trafo-oleje v závislosti na tlaku při působení slabě nehomogenního pole.

Fluorid sírový byl zvolen jako nejvhodnější elektroegativní plyn z důvodu toho, že molekula  $SF_6$  disocijuje při nízké teplotě, kde maximální disociace probíhá při cca 2000[K]. V tomto okamžiku plyn odebírá nejvíce disociační energie, kterou čerpá z okolí v tomto případě z el. oblouku a tím je oblouk ochlazován. Celý výše uvedený proces je vyobrazen na křivce tepelné vodivosti plynu  $SF_6$  a dusíku viz. obr. 3.8. Výsledkem celého procesu je menší poloměr ionizovaného sloupce oblouku. Tím oblouk dosáhne nižší časové konstanty a dochází tam k mnohem vyšší setrvačnosti oblouku než v případě použití jiného média (viz. kapitola 2)[3].

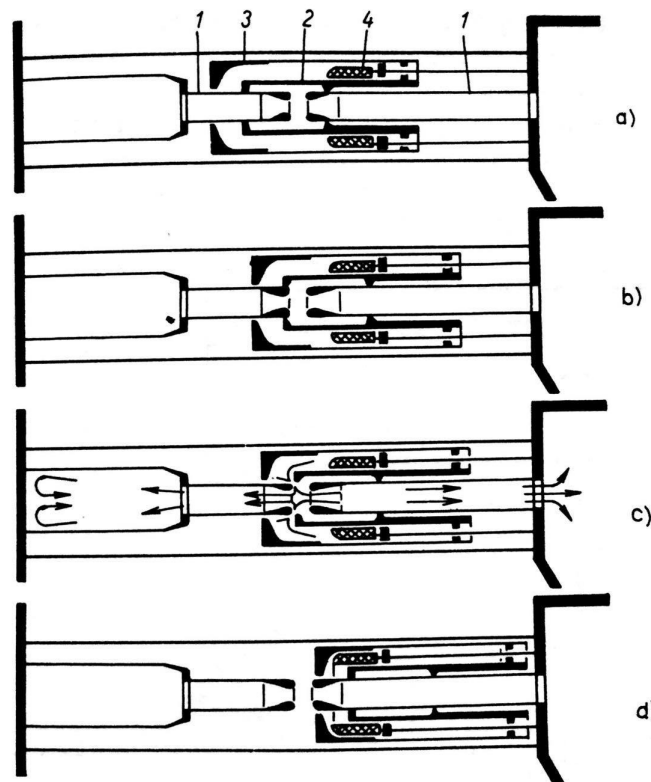


**Obr. 3.8:** Tepelná vodivost dusíku  $N_2$  a fluoridu sírového  $SF_6$  v závislosti na teplotě [Převzato z [3]]

Z konstrukčního hlediska se tyto vypínače podobají vypínačům tlakovzdušným. Základní provedení těchto vypínačů se rozděluje na základě zhášecí komory, která se vyvíjela postupně na základě nově nabytých znalostí charakteristik zhášecího plynu. Z výše uvedených důvodů se nejdříve vyvíjeli *dvoutlaké vypínače*, kde se vyrovnával tlak v zhášedle a vně pomocí kompresoru. Toto řešení mělo mnoho provozních nevýhod což vedlo k konstrukčně jednoduššímu řešení, kde se tlakový rozdíl, který zapříčiňuje proudění plynu, vytváří pomocí pístu, který je spojen s kontaktním ústrojím. Tento druh konstrukčního řešení se nazývá *jednotlakové* a přetrvává do současnosti. Zhášecí komory se zde také spojují sériově v závislosti na parametrech vypínače. Na obrázku 3.9 je vyobrazen vypínací proces vypínače s jednotlakovou komorou s popisem jednotlivých částí komory: *1 zhášecí trysky; 2 válcový kontakt; 3 tlakový válec; 4 píst*. Problematice zhášecí komory se budeme věnovat v následujících kapitolách[2]. Další dělení je možné dle celkové konstrukce vypínače na:

- Dead tank - což sou vypínače s zhášedlem umístěném v kovovém pouzdře, které je uzemněno.
- Live tank - v tomto případě je zhášedlo umístěno v izolátoru.





**Obr. 3.9:** Řez jednotlakovou zhášecí komorou vypínače  $SF_6$  v různých vypínacích polohách.  
 a) zapnutý stav, b) stlačování plynu, c) proudění plynu-vypínání, d) vypnutý stav  
 [Převzato z [2]]

### 3.2 Historický vývoj vypínačů

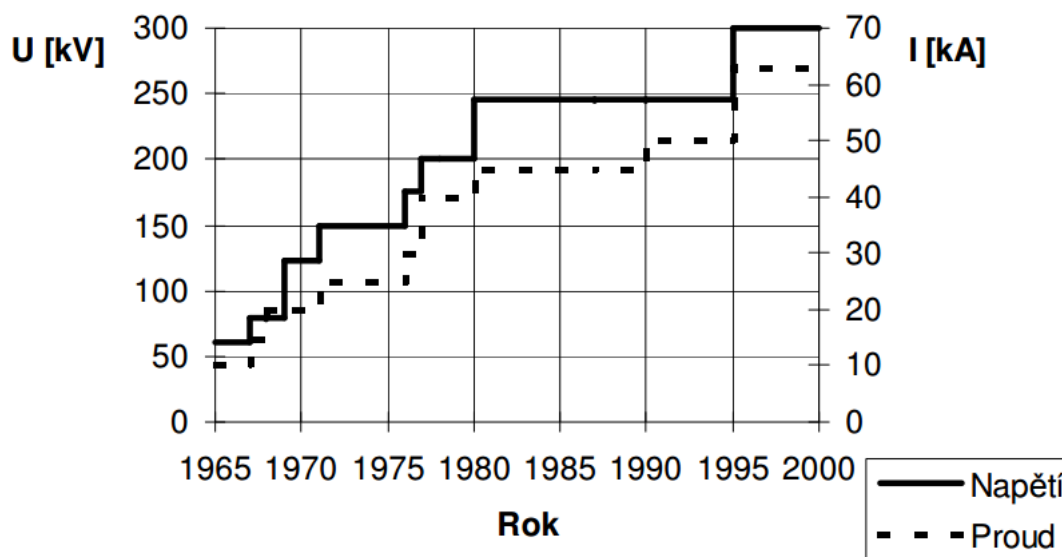
Koncem devatenáctého století, příchodem a rozvojem elektrické sítě pro vysoké napětí později VVN a ZVN se začal řešit potřeba vypínačů. V počátcích vývoje zhašení elektrického oblouku bylo mnoho objeveno mnoho principů jak úspěšně zhášet a postupem času byli technicky zdokonaleny.

Z mnoha principů a technických řešení našli nejefektivnější využití pro tzv. **kotlový olejový vypínač**. Tento druh vypínače ve 30. letech dvacátého století ovládl trh. Nevýhodou toho typu vypínače byla obrovská spotřeba transformátorového oleje, který zde sloužil jako zhášecí médium a zároveň izolátor proudové dráhy umístěné v kovové uzavřené nádrži. Velká spotřeba oleje byla zapříčiněna znečišťováním sazemi vlivem rozkladu oleje, jenž byl zapříčiněný vysokými teplotami při působení el. oblouku. Ve Spojených státech se našlo uplatnění těchto vypínačů do cca poloviny 60. let jelikož měli dostatek ropy.

Jelikož nároky na velikost vypínaných zkratových výkonů a vypínacích proudů rostly tak bylo zapotřebí přijít s ničím účinnějším. Přičemž v roce 1928 bylo vyvinuto zhašení v **deionizační mřížce**, která pracovala na principu vytlačení el. oblouku do kovového roštu, který ho roztrhal na velký počet malých oblouků v sérii, které byli snadněji zhašeny. V tomto případě potřeboval oblouk ke svému hoření daleko větší napětí než původní oblouk z důvodu úbytků napětí na katodových a anodových přechodek, které byli na kaž-

dém dílčím oblouku. V roce 1929 začalo být využíváno i **výbušné komory**. Ta pracovala na principu uvolňování plynů při rozkladu oleje a následného růstu tlaku v uzavřené komoře. Komora byla uzavřena roubíkem pohyblivého kontaktu a při jeho vysunutí se začal nadměrný tlak uvolňovat otvorem a tím i ochlazovat oblouk. Tento způsob prošel mnoha vývoji jelikož 1. verze se potýkali s problémem doby chlazení oblouku, která se často nesetkala s průchodem proudu nulou a tím se snižovala účinnost tohoto systému.

V 30. letech se též začali vyvíjet **tlakovzdušný , expanzní vodní a máloolejové vypínače**. Kde tlakovzdušný vypínače prošli největším vývojem a byli jako jediné schopny vypínat na hladinách VVN a ZVN. Což bylo velice technicky náročné, jelikož se musel zvyšovat provozní tlak vypínačů, a to vyžadovalo velice náročné požadavky na konstrukční řešení vypínače. V 60. letech začali rozvíjet **tlakoplynové vypínače s plynem  $SF_6$** , které se zdokonalují do dnes. Na obrázku 3.10 je zřetelný vývoj vypínačů  $SF_6$  a růst jejich vypínací schopnosti. Současně s  $SF_6$  vypínači se používají dnes vakuové vypínače, které se uplatňují na nižších napěťových hladinách (vn). Vakuové vypínače jsou stále vyvíjeny a očekává se že časem budou využitelné i na vyšších hladinách[3].



Obr. 3.10: Nárůst vypínací schopnosti vypínačů  $SF_6$  |Převzato z [4]|

## 4

# Spínací děje—časový a prostorový rozbor

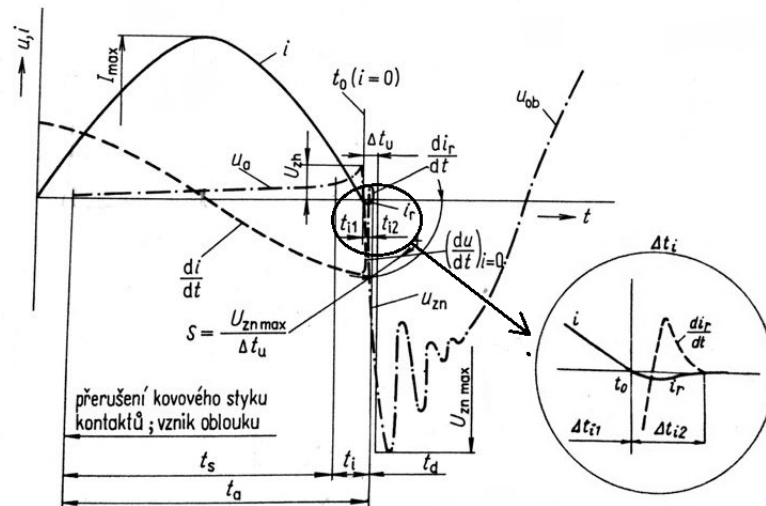
Při zapínání či vypínání vypínačů pod zatížením dochází ke spínacím dějům (vypínání a zapínání). V našem případě se zaměříme vypínací děj ke kterému dochází při rozpojování kontaktu vypínače a jejich postupnému oddalování. Tento děj probíhá po dobu celého procesu vypínání tedy neskončí při maximálním oddálení kontaktů, ale skončí až po úspěšném uhašení oblouku, který vznikne mezi kontakty (vznik oblouku viz. kapitola 2). Vypínací děj byl analyzován ve skutečných zhášecích komorách. Na základě rozboru analýzy je vypínací proces dělen podle času a prostoru, zejména ve střídavých sítích. Z časového hlediska jsou definovány tři základní intervaly vypínacího děje:

1. Silnoproudý interval
2. Interakční interval
3. Dielektrický interval

Z důvodu závislosti jednotlivých intervalů na frekvenci proudu a na časové konstantě oblouku, která je ovlivněna velikostí proudu a uspořádání zhášecí komory.

U prostorového rozdělení se jedná o konstrukční prvky vypínače. Záleží na druhu zhášecí komory (*s jednostranným prouděním nebo dvoustranným prouděním*), druhu zhášecího média, poloze kontaktů apod. . . [2]. Procesy (vypínání oblouku a proudění plynu) při vypínání v zhášecí komoře lze charakterizovat v prostorových **axiálních a radiálních zónách**, které jsou odvozeny z charakteristických jevů při ochlazení oblouku proudícím plynem[1].

Veškeré výše uvedené rozdělení zásadně ovlivňují vypínací proces. Během vypínání střídavého proudu je vypínací proces závislý na proměnlivém zdvihu kontaktu z jejich časového hlediska, druhu a tlaku plynu, ale i na proudu procházejícím obloukem. Zmíněné parametry jsou vzájemně závislé[2].



Obr. 4.1: Základní intervaly vypínacího procesu [Převzato z [2]]

Popis jednotlivých částí obrázku se znázorněnými intervaly obr.4.1:  $t_s$ -silnoprůdý interval,  $t_i$ -interakční interval,  $t_{i1}$ -interval výrazné změny obloukového napětí,  $t_{i2}$ -interval zbytkového proudu,  $t_d$ -dielektrický interval,  $t_a$ -doba hoření oblouku,  $i$ -proud,  $i_r$ -zbytkový proud,  $u_a$ -napětí oblouku,  $U_{zh}$ - ztlumovací amplituda napětí,  $u_{zn}$ -zotavené napětí,  $U_{znmax}$ - maximální hodnota zotaveného napětí,  $u_{ob}$ -obnovené napětí,  $S$ -strmost zotaveného napětí,  $\Delta t_u$ -doba od průchodu nulou do okamžiku protnutí tečny obalující křivku  $u_{zn}$  v hodnotě  $U_{znmax}$ .

## 4.1 Silnoprůdý interval

Jedná se o interval značený o obrázku 4.1 jako  $t_s$ . Tento interval je oblastí hoření oblouku, který zahrnuje oblast velkých zkratových proudů protékajících obloukem během vypínání. Vzhledem k rychlosti vnitřních jevů v oblouku a malé změně proudu při sinusovém proudu v okolí maxima můžeme v tomto intervalu pohlížet na oblouk jako stacionární. Přičemž neuvažujeme vzájemnou interakci obloukového napětí a proudu v obvodu, který je dán parametry obvodu. Toto tvrzení platí jelikož obloukové napětí je poměrně malé a činný odpor oblouku zanedbatelný v porovnání s impedancí zkratového obvodu. V případě vypínání malých induktivních nebo malých kapacitních proudů zmíněné tvrzení neplatí, jelikož vlivem velkého obloukového napětí dochází k deformaci křivky proudu. Vlastnosti oblouku v tomto intervalu jsou uvažovány jako ve stacionárním stavu a udává je zejména velikost proudu a intenzitou chlazení.

Oblouk lze v tomto intervalu popsat dle Cassieho teorie dynamického oblouku. Jelikož v tomto intervalu se jedná o oblast velkých proudů tedy i *velkého průměru oblouku* což je základním předpokladem Cassieho teorie. Jelikož má oblouk velký průměr je třeba stanovit vypínací kritéria, která zamezují tomu aby došlo k tzv. *zahlcení trysky*, což by mohlo vlivem způsobu narušení vypínacího procesu a případné sléhání vypínače (tzv.

termické selhání).

**Zahlčení trysky:** Důležitý jev v silnoprúdém intervalu. Jeto takový stav při kterém je tak velký průměr oblouku, že dochází k vyplnění hrdla zhášecí trysky v takové míře, že dochází k zabránění proudění studeného plynu přes trysku do výfuku. Jedná se tedy o stav narušení proudění a chlazení oblouku. Při zmenšení proudu se obnoví proudění a chlazení oblouku. Poroto se udávají vypínací kritéria zejména proudu zahlčení  $I_{thm}$ , který lze určit výpočtem (výpočet tohoto proudu bude uveden v kapitole 4.4)[1, 2].

## 4.2 Interakční interval

Tento interval se vyznačuje v okolí produktové nuly a na obrázku 4.1 je označen jako  $t_i$ . V tomto intervalu dochází k vzájemné interakci mezi vypínaným obvodem a obloukem v zhášecí komoře. Je to klíčový interval ve kterém se rozhoduje o vypnutí nebo selhání vypínače. Veškerá problematika spínacího pochodu se opírá tuto oblast spínacího děje, jelikož je zde klíčová energetická bilance oblouku která rozhoduje o výsledku vypnutí (*energetická bilance je základem všech modelů oblouku viz. předchozí kapitoly*).

Oblouk je zde intenzivně chlazen, průměr malý a napětí oblouku vzrůstá rychle. Přičemž můžeme tento interval teoreticky rozdělit na dva intervaly, které jsou na obrázku 4.1 značeny jako  $t_{i1}$  a  $t_{i2}$ . Kde interval  $t_{i1}$  se označuje jako *interval výrazné změny obloukového napětí*, který se nachází před průchodem proudu nulou viz. detail na obrázku 4.1 a  $t_{i2}$  je tzv. *interval zbytkového proudu* po průchodu proudu nulou, kde dochází k průchodu malého zbytkového proudu daného zbytkovou vodivostí. Velikost i dobu trvání tohoto proudu se snažíme omezit.

V interakčním intervalu je nutné respektovat vlivy tepelné setrvačnosti oblouku, jelikož dochází k rychlým změnám proudu v okolí průchodu nulou, proto zde řešíme diferenciální rovnice pro dynamický oblouk. Základní veličinou charakterizující tepelnou setrvačnost je časová konstanta oblouku (*rov. 2.17*). Obloukové napětí, vodivost, teplota a tepelný obsah neodpovídají okamžité hodnotě proudu vlivem tepelné setrvačnosti, a proto je nutné tento interval zkoumat jako dynamický oblouk a uvažuje se zde tedy minimální poloměr oblouku vzhledem k trysce, takže zde nemůže dojít k zahlčení trysky. Oblouk v tomto intervalu tedy řeší zejména Mayrova teore dynamického oblouku.

Základní vlastní veličiny rozhodující o vypínací schopnosti v tomto intervalu jsou *strmost poklesu proudu*  $(di/dt)_{i=0}$  a *strmost zotaveného napětí*  $(du_{zn}/dt)$  [1, 2].

## 4.3 Dielektrický interval

Dielektrický interval se vyznačuje jako  $t_d$  na obrázku 4.1. je to interval, který nastává pro přerušení proudu v elektrickém obvodu. V případě úspěšného přerušení proudu je derivace proudu  $di/dt$  maximální a poté proud jako zbytkový klesá na nulu. Jestli že

dojde v dielektrickém intervalu k selhání a dojde k opětovnému zapálení oblouku vlivem přeskočku, nastane skoková změna v průběhu  $di/dt$  z nulové na maximální hodnotu.

Vypínací dráha mezi kontakty je namáhána zotaveným napětím ( $u_{zn}$ ), které je časově proměnlivé a je dáno elektrickým obvodem. K úspěšnému vypnutí dojde v případě, že průrazné napětí vypínací dráhy je vyšší než napětí zotavené v každém okamžiku. Vedle hodnoty vypínaného proudu je v tomto intervalu důležitá strmost nárůstu zotaveného napětí. V případě vysoké strmosti nárůstu napětí v době proudění zbytkového proudu může dojít k opětovnému zapálení oblouku vlivem *termického selhání*, jelikož vypínač nestíhá odvádět teplo ze zbytkového sloupce oblouku. Vysoká strmost růstu zotaveného napětí může mít za důsledek překročení amplitudy zotaveného napětí hodnotu průrazného napětí. Tento děj může vést opět k neúspěšnému vypnutí vypínače v důsledku tzv. *dielektrického selhání*. Elektrická pevnost a její rozložení je ovlivněno termodynamickými poměry mezi kontakty, které jsou ovlivněny dobou hoření oblouku, zejména v silnoproudém intervalu, kde dochází k ohřívání plynu a kontaktů což snižuje elektrickou pevnost. Proto se nejčastěji dielektrické selhání vyskytuje v počáteční fázi nárůstu zotaveného napětí při velké strmosti nárůstu [2, 3].

## 4.4 Limitní strmost zotaveného napětí

Vztahy pro zjištění limitní strmosti zotaveného napětí jsou odvozeny z interakčního intervalu s obecnou platností. Odlišnosti můžeme najít pouze v odlišně definovaném významu veličin. Pro limitní strmost zotaveného napětí platí tedy obecný vztah:

$$S_{lim} = f \left( C, \frac{di}{dt}, v, \alpha, p, l_a \right), \quad (4.1)$$

kde jsou jednotlivé veličiny odvozeny dle příslušných teorií a mají následující význam:  $C$  - konstanta zahrnující uspořádání zhášecí komory (*konstrukční vlastnosti, vtok plynu, výfuk atd. . .*), která se zjišťuje experimentálně;  $v$  - veličina určující charakter přenosu energie z oblouku do okolí pro obsah, tepelnou vodivost plynu, poloměr oblouku a především na tlaku plynu;  $\alpha$  - měrná chladivost plynu;  $p$  - tlak plynu působícího na oblouk;  $l_a$  - délka charakteristického oblouku pro chlazení;  $di/dt$  - strmost vypínacího proudu při nulové hodnotě proudu.

Výsledný zjednodušený aplikovatelný vztah pro výpočet limitní strmosti zotaveného napětí při uvažování konstantního zhášecího zdvihu je:

$$S_{lim} = C_{et} \cdot C_{tr} \cdot D_t \cdot p \cdot I_v^{-m}, \quad (4.2)$$

kde  $C_{et}$  - experimentálně zjištěná konstanta zahrnující  $v$  a  $\alpha$ ;  $C_{tr}$  - konstanta respektující uspořádání komory a druh plynu;  $D_t$  - průměr zhášecí trysky;  $I_v$  - vypínací proud. Tento vztah je vhodný pro rychlé rozhodování při návrhu a zkoušení modelů zhášecích komor [2].

Uvedené vztahy platí pro oblasti spínacího děje v komoře kde nenastává zahlcení trysky, proto z nich po úpravě můžeme určit maximální hodnotu proudu pro, který nedojde k zahlcení trysky:

$$I_{thmax} = C \cdot S_t \cdot p^s \cdot l_a^{-0,5}, \quad (4.3)$$

kde  $S_t$  - průřez zhášecí trysky;  $p$  - tlak v komoře;  $s$  - exponent respektující druh plynu. Tento vztah byl ověřen experimentálně pro vzduch v tlakovém rozmezí 0,9-5,1 [MPa][2].

## 5

# Vypínací schopnost vypínače–zhášecí komora, tlak plynu

Zhášecí komora je nejdůležitější částí vypínače a nejvíce ovlivňuje celou jeho vypínací schopnost. Jedná se o „základní kamen“ celého vypínače od kterého se odvíjí celkové řešení vypínače (*izolátory, izolační táhla, pohon atd. . .*). Vypínací schopnost vypínače je hlavním kritériem podle které se volí varianta zhášecí komory, potřebné množství plynu ( $S_{F6}$ ) k zhášení z čehož vyplývají nároky na pohon. Základní vlastnosti (***druhy proudění, zhášecí trysky***) zhášecího ústrojí se porovnávají pro předpokládané varianty se stejnými vstupními parametry (tlak plynu, tvar trysek, zdvih kontaktů). Porovnávání se odvozuje pro interakční interval a vychází se zde z upravené rovnice pro limitní strmou zotaveného napětí (4.2). Výchozí vztah pro porovnání je tedy při zachování podobnosti pro danou frekvenci[1]:

$$S_{lim} = konst \cdot l_a \cdot I_v^{-m}. \quad (5.1)$$

### 5.1 Druh proudění

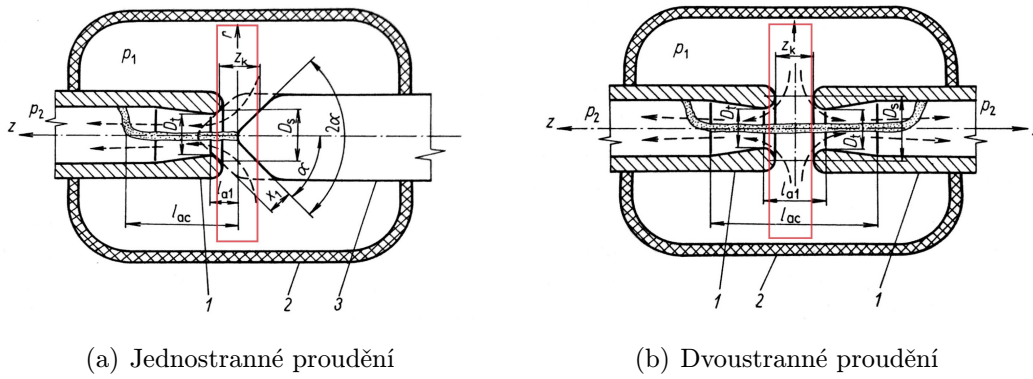
Zhášení komory mohou mít dva druhy uspořádání proudění **jednostranné** nebo **dvoustranné**. Oba z uvedených druhů jsou znázorněny na obr. 5.1. Z uvedeného obrázku (b) vyplývá, že o dvoustranném proudění můžeme pomýšlet jako o dvou jednostranných, jelikož je dvoustranné proudění souměrné podle osy  $r$ . Délka oblouku dosahuje u dvoustranného proudění tedy dvojnásobné vzdálenosti což je patrné v rovnici odvozené ze vztahu (5.1):

$$S_{lim2} = 2 \cdot S_{lim1} \cdot \left( \frac{I_{V2}}{I_{V1}} \right)^{-m}, \quad (5.2)$$

kde index **2** značí veličiny dvoustranného proudění, exponent  $m$  je tzv. exponent proudu a uvažujeme zde  $l_{a2} = 2 \cdot l_{a1}$ .

Z výše uvedeného vztahu (5.2) lze odvodit vztah pro zjištění poměru vypínacích





**Obr. 5.1:** Schématické uspořádání zhášecí komory talkovzdušného vypínače [Převzato z [3]],  
 1-zhášecí tryska; 2-tlaková izolační nádoba; 3-kontakt;  $D_t$ -průměr zhášecí trysky;  $z_k$ -  
 zdvih kontaktů;  $l_a$ -délka oblouku;  $l_{a1}$ -charakteristická délka oblouku

proudů:

$$I_{V2} = 2 \cdot I_{V1} \cdot \left( \frac{S_{lim1}}{S_{lim2}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5.3)$$

V případě vypínání blízkého zkratu uvažujeme strmost zotaveného napětí přímo konstantní vypínanému proudu ( $S = konst \cdot I_v$ ) a vztah (5.3) můžeme upravit do následující podoby:

$$I_{V2} = 2^{\frac{1}{m+1}} \cdot I_{V1} \quad (5.4)$$

Dle uvedených vztahů můžeme porovnávat druh proudění a vyplývá zde, že strmost zotaveného napětí je při stejném vypínaném proudu dvojnásobná v dvoustranném proudění oproti jednostrannému. Reálně dosahuje limitní strmost zotaveného napětí dvoustranného proudění cca 2,2 násobku, protože jednostranné proudění má z důvodu zamezení nepříznivým vlivům proudění (*klidové zóny s hromaděním ionizovaných plynu*) kuželovitě tvarované zakončení plného kontaktu.

Z pohledu průrazného napětí zde platí obdobná analogie při uvažování symetrie. Poměr průrazného napětí můžeme tedy uvažovat  $U_{p2}/U_{p1} = 2$ , tedy dvoustranné proudění má dvojnásobné průrazné napětí při vzdálenosti kontaktů o cca 1,4 násobek vzdálenosti kontaktů jednostranného proudění. Největší nárůst průrazného napětí je v oblasti vytlačování horkého plynu, vlivem vysokých teplot. Zmíněné tvrzení byla experimentálně ověřena v disertační práci prof. Vostrackého [1].

### 5.1.1 Izolační zhášecí tryska

Jedná se o stav kdy je kontakt již vysunut z izolační zhášecí trysky. Opět zde uvažujeme, že obě strany komory jsou stejné a též tlak v kompresním prostoru. Platí zde obecné zavislost (5.2), ale v případě definované délky oblouku jako efektivně chlazené délky, můžeme při zachování tvarů zhášecí trysky a charakteru proudění uvažovat, že je délka oblouku

úměrná průměru zhašecí trysky. Platí zde tedy:

$$S_{lim2} = 2 \cdot S_{lim1} \cdot \frac{D_t + D_{t1}}{D_t} \cdot \left( \frac{I_{V2}}{I_{V1}} \right)^{-m} \quad (5.5)$$

$$I_{V2} = I_{V1} \cdot \left( \frac{D_t + D_{t1}}{D_t} \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (5.6)$$

kde  $D_{t1}$  je průměr trysky pohyblivého kontaktu.

Tvar kontaktů a proudění plynu zde více ovlivňují průrazné napětí. Dvoustranné proudění zde má kratší dobu čištění horkých plynů ze vstupní zóny trysky. Dochází tedy k rychlejší obnově napěťové pevnosti a tedy je zde kratší vzdálenost kontaktů pro určitou napěťovou pevnost oproti jednostrannému proudění.

Z celkového hodnocení mají dvoustranné proudění vyšší vypínacích schopnosti. Přičemž jednou z hlavních výhod je odvádění ionizovaných částic z elektrod přímo do jejich dutin a omezují tím tedy jejich obsah mezi kontakty a urychlují dobu obnovy el. pevnosti. V případě požadavku na stejné limitních strmosti zotaveného napětí pro daný proud v jednostranném proudění musíme volit průměr zhašecí trysky 2 krát větší. S potřeba plynu na zhašení dosahuje též dvojnásobku což má za důsledek velké nároky na dimenzování zhašecí komory. V případě vypínačů s plynem  $S_{F6}$  se používají obě uspořádání a pro požadavky na vypínání nejvyšších parametrů se využívají výhradně dvoustranné uspořádání [1].

## 5.2 Tlak plynu

Tlak plynu je další klíčový parametr, který musíme zohledňovat při návrhu vypínače. Jeho stanovení vychází z technických (*druhu proudění*), provozních a ekonomických hledisek. Schopnost vypínání vypínače je přímo závislá na tlaku plynu. Velikost tlaku plynu má ovšem své technické meze, které jsou stanoveny mechanickou pevností použitých konstrukčních materiálů a vlastnostmi daného zhašecího plynu (*tedy vlastnostmi plynu  $S_{F6}$* ). V případě plynu  $S_{F6}$  je velikost omezena podmínkou kapalnění plynu při poklesu teploty. Což je do teploty poklesu  $-30^{\circ}\text{C}$  0,6 [MPa] při  $20^{\circ}\text{C}$ . V případě požadavku vyššího tlaku nebo nižší teploty poklesu musíme vypínač ohřívat nebo ho umístit do lehkého krytí.

Z hlediska vypínání zde musíme dodržovat nadkritické tlakové poměry, které jsou u plynu  $S_{F6}$  přibližně  $\frac{p1}{p2} > 1,8$  a zachovávají charakter proudění plynu. V případě nedodržení této podmínky dochází u plynu ke změně tlaku, hustoty a podstatné rychlosti proudění.

Vliv tlaku plynu na limitní strmosti vypínače můžeme snadno určit pro dvoutlakový princip, kde uvažujeme konstantní tlak v komoře. V silnoproudém intervalu je tedy možné

pro daný průměr oblouku odvodit proudy zahlcení následujícím vztahem:

$$I_{thmax} = konst. \cdot p^{-0,5}. \quad (5.7)$$

Limitní strmost zotaveného napětí v závislosti na tlaku lze určit pro stejný vypínací proud vztahem:

$$S_{lim} = S_{lim1} \cdot \left( \frac{p}{p_1} \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (5.8)$$

kde  $S_{lim1}$  je limitní hodnota zotaveného napětí při tlaku  $p_1$ . Exponent  $s$  je určen modelem oblouku a zohledňuje použité plyny. Uvádí se hodnota  $s = 1,5 - 1,65$  (v dis. práci prof. Vostrackého [1] experimentálně zjištěna hodnota  $s = 1,4$  pro plyn  $S_{F6}$ ).

V případě jednotlakového systému je tlak ovlivněn termodynamikou proudění a tepelným působením oblouku. Řešení všech vztahů pro určení tlaku plynu je dosti složité, proto uvažujeme geometrickou a funkční dynamickou podobnost komor. Na základě toho lze zjednodušit výpočet na porovnání podobných jevů, které jsou ovlivněny v zásadě počátečními podmínkami. Tlak plynu v oblasti mech. zdvihu kontaktů  $z_m - z_p$  určit vztahem:

$$p_1(z_p) = p_{10} \cdot \left( \frac{1}{1 - \frac{S_p \cdot z_p}{V_p + S_p \cdot z_m}} \right), \quad (5.9)$$

kde  $V_r$  je zbytkový objem po ukončení pohybu kontaktů  $z_m$ ,  $z_p$  je konečná vzdálenost zdvihu kontaktů. Probíhá zde komprese plynu, expanze průtokovými ventily a ohřev plynu. Průtočné průřezy se nejdříve se vzdáleností kontaktů zvětšují a poté se stávají konstantní.

Vlivem působení oblouku dochází k přírůstku tlaku  $\Delta p_{th}$ . Výpočet tohoto přírůstku je v dis. práci prof. Vostrackého [1]. Vliv tohoto přírůstku se projevuje zřetelně jen v době zahlcení trysky v ostatních případech u skutečných vypínačů není jeho vliv podstatný.

Veškeré výše uvedené vztahy týkající se vlivu tlaku plynu jsou aplikovatelné na základě zjednodušujících předpokladů zachování podobnosti funkčních závislostí, které ovlivňují pouze počáteční podmínky. Tento postup je plně dostačující v projekční a zkoušecí etapě v praxi dostačující. V současné době vlivem rozvoje počítačové techniky jsou k dispozici moderní metody (*tzv. metody konečných prvků*) k zjišťování výše uvedených hodnot.

## 6

# Charakteristiky vypínací schopnosti vypínače

Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů vychází z modelů oblouku (kap.2), charakteristik zhášecí komory (kap.5) a funkce vypínače v síti (přechodné jevy apod...). Na základě uvedených rozborů stanovujeme podmínky pro **limitní charakteristiky vypínače** (*vnější charakteristiky*). Pomocí těchto charakteristik definujeme faktické vlastnosti vypínače, které se využívají při volbě a řešení nedostatků vypínače. Tyto charakteristiky se charakterizují pro nejobtížnější provozní podmínky. Poté můžeme následně z těchto mezních charakteristik zhodnotit funkci vypínače v síti.

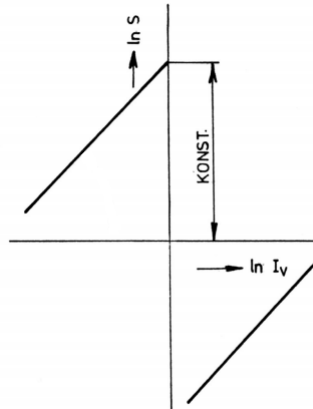
Z důvodu náhodného začátku vypínacího procesu v kladné nebo záporné polaritě vypínaného proudu (*též i polaritou zotavovacího napětí*) existují charakteristiky pro obě polarity. Absolutní hodnoty těchto charakteristik se mohou lišit, jsou závislé na uspořádání zhášecí komory. Jednotlivé části charakteristiky se odvozují z iteračního a dielektrického intervalu:

### 6.1 Interakční interval - vypínací charakteristika

Tento interval byl již specifikován v kapitole 4. V tomto intervalu nabývá polarita vypínaného proudu opačné znaménko oproti strmosti zotaveného napětí. Z čehož vyplývá, že vypínací charakteristika je přímo závislá na polaritě vypínaného proudu v půlplně vypínání. Uvedenou závislost můžeme vyjádřit jako limitní následujícím vztahem:

$$S_{lim} = \frac{\frac{di}{dt}}{\left| \frac{di}{dt} \right|} \cdot konst. \cdot \left| \frac{di}{dt} \right|^{-m}, \quad (6.1)$$

kde exponent  $m$  se určuje z teoretických modelů v rozmezí 1-3. Ve výše uvedené závislosti existují tedy dvě limitní charakteristiky, pro každou polaritu. Tyto charakteristiky můžeme vyjádřit v logaritmických souřadnicích jako konstantní přímky např. obrázek 6.1.



**Obr. 6.1:** Závislost strmosti zotaveného napětí na vypínaném proudu (záporným) [Převzato z [1]]

Z praktického hlediska určujeme platnou limitní charakteristiku z jednoho bodu s určitými mezníma vlastnostmi  $I_1$  a  $S_1$ . Tento bod se většinou ověřuje experimentálně. Na základě čehož můžeme danou závislost vyjádřit vztahem:

$$S_{limL} = S_1 \cdot \left(\frac{I_v}{I_1}\right)^{-m}, \tag{6.2}$$

Strmost zotaveného napětí není jediným důležitým parametrem v interakčním intervalu. Velice podstatným parametrem je doba zpoždění  $t_d$ , která byla považovaná jako konstantní ve výše uvedených závislostech (6.1,6.2). Tato doba zpoždění se většinou určuje blízký zkrat na vedení při kterém je doba zpoždění téměř konstantní a velice malá. V případě svorkového zkratu je doba zpoždění různá ( $t_d = 1,5 - 10\mu s$ ) závislá na obvodu. V případě tohoto druhu zkratu se uvažuje jako nejkratší doba  $t_d$  pro vysoké hodnoty proudu. Limitní strmost pro svorkový zkrat vyjádřenou pomocí zotaveného napětí pro blízký zkrat s nejnižším  $t_d$  lze určit následujícím vztahem:

$$S_{limT} = k_T \cdot S_{limL} = e^{\epsilon \cdot (t_{dT} - t_{dL})} \cdot S_{limL}, \tag{6.3}$$

kde  $t_{dT}$  je doba zpoždění pro svorkový zkrat,  $t_{dL}$  je doba zpoždění pro blízký zkrat a  $\epsilon = 1,5[\mu s^{-1}]$  které se určuje pro jednotlivé vypínače námi uvedené číslo je odvozeno pro vypínač ŠKODA (z dis. práce prof. Vostrackého [1]), ale jeho přesnost je dostačující i pro ostatní vypínače v praxi.

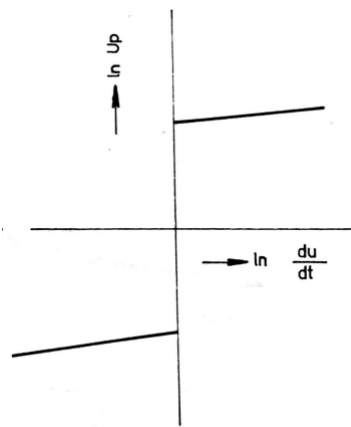
V interakčním intervalu tedy můžeme zjistit limitní strmosti zotaveného napětí pro vypínací charakteristiku a vyjádřit jej funkcí  $S_{lim} = f(I_v)$  pro blízký zkrat ( $S_{limL}$ ) a pro svorkový zkrat ( $S_{limT}$ ) s nejkratší dobou zpoždění.

## 6.2 Dielektrický interval - vypínací charakteristika

Charakteristické vlastnosti tohoto intervalu byli již zmíněny v předchozí kapitole 4. Obdobně jak u interakčního intervalu je zde charakteristika průrazného napětí, které je v tomto intervalu jednou z kličkových hodnot, závislá na znaménku derivate vypínané proudové půlply. Průrazné napětí můžeme tedy popsat následujícím vztahem:

$$U_p = -\frac{\frac{di}{dt}}{\left|\frac{di}{dt}\right|} \cdot konst. \cdot |I_v|^{-\delta}, \quad (6.4)$$

Vyskytují se zde též dvě větve charakteristiky jak je patrné z obr. 6.2. Z čehož je patrné, že průrazné napětí je závislé na časovém průběhu zotaveného napětí a se strmostí tohoto napětí nepatrně roste. Zmíněné vlastnosti jsou platné pro charakteristiku kde neuvažujeme tepelný vliv vypínaného proudu (*tzv. studená charakteristika*).



**Obr. 6.2:** Závislost průrazného napětí na strmosti růstu zotaveného napětí |Převzato z [1]|

V podobnosti s interakčním intervalem zde můžeme vycházet též z praktického hlediska a určit zde limitní hodnotu  $U_{p1}$  a  $I_1$ . Na základě těchto hodnot můžeme charakteristiku vyjádřit pomocí vztahu:

$$U_p = U_1 \cdot \left(\frac{I_v}{I_1}\right)^{-\delta}, \quad (6.5)$$

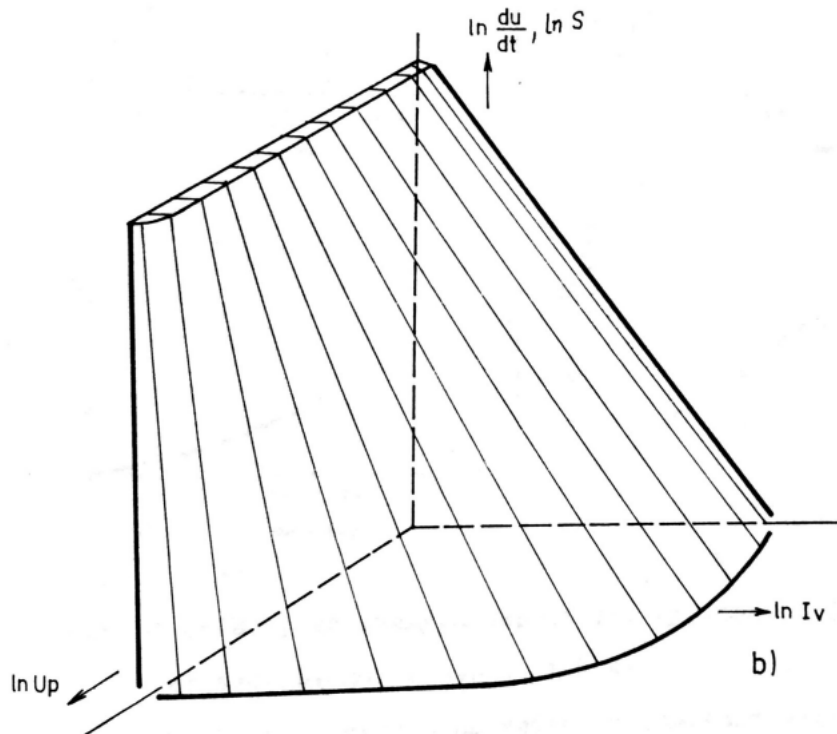
kde hodnota  $\delta$  se určuje v rozmezí 0,1-0,15.

Charakteristiku průrazného napětí v tomto intervalu můžeme tedy vyjádřit jako funkci  $U_p = f(I_v)$  a uvažovat jen jednu větev s nejmenšími hodnotami. Polarita vypínaného proudu má zde vliv na kritickou hodnotou průrazného napětí na pevném kontaktu při vypínání zkratových (*svorkový zkrat*) i kapacitních proudů.

## 6.3 Charakteristika vypínací schopnosti

Výše uvedené charakteristiky v interakčním a dielektrickém intervalu můžeme znázornit v jedné charakteristice *tzv. Charakteristice vypínací schopnosti*, která se znázorňuje

v prostorových souřadnicích pro tři zmiňované veličiny ( $I_v, U_p, du/dt = S$ ). Na obr. 6.3 je vyobrazena charakteristika vypínací schopnosti v logaritmických souřadnicích pro jednu prostorovou větev z výše uvedených charakteristik. V případě uvážení všech skutečností můžeme uvedenou charakteristiku znázornit v rovině jako dvě charakteristiky  $U_p = f(I_v)$  a  $S_{lim} = f(I_v)$ .



Obr. 6.3: Charakteristika vypínací schopnosti (logaritmické souřadnice) [Převzato z [1]]

## 6.4 Limitní charakteristika vypínací schopnosti v síti

Limitních hodnot dosahují nejčastěji vypínače v sítích (VN, VVN, ZVN) při vypínání zkratových proudů. Řešíme zde dva základní stavy: vypínání svorkové zkratu a blízkého zkratu, kde se nejvíce liší maximální hodnota zotaveného napětí a především jeho průběh. Z výše uvedených informací vyplývá, že řešíme kritické disciplíny vypínací schopnosti pro interakční a dielektrický interval. Přičemž interakční interval řeší jako kritickou disciplínu blízký zkrat na vedení a dielektrický interval svorkový zkrat.

V případě blízkého zkratu je strmost zotaveného napětí udávána pro stranu vedení vztahem:

$$S_L = \frac{du_L}{dt} = Z_L \cdot \frac{di}{dt} = \sqrt{2} \cdot \omega \cdot Z_L \cdot I_v, \tag{6.6}$$

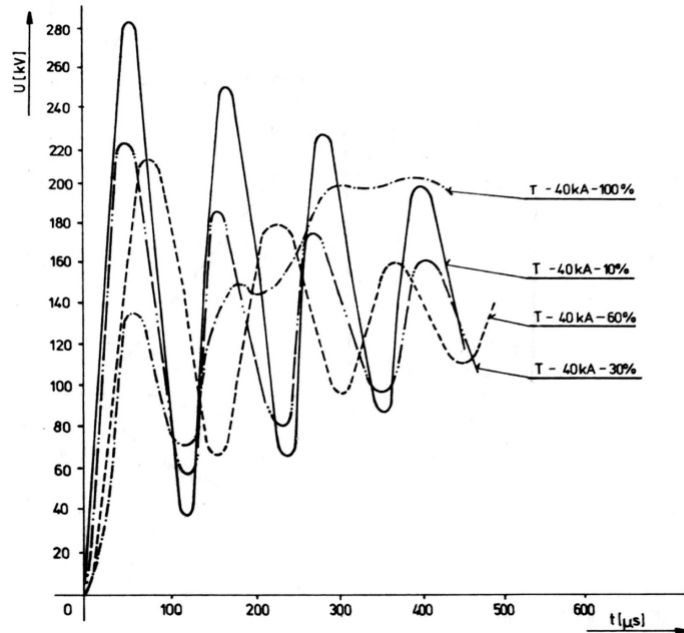
kde  $Z_L$  je impedance vedení (normalizovaná je 450[Ω]) a  $I_v$  je vypínaný proud.

U svorkového zkratu je zotavené napětí závislé na jeho strmosti, vypínaném proudu a především na vrcholové hodnotě napětí  $U_C(U_C)$ , která lze pro 1. vypínací fázi určit

vztahem:

$$U_C = k_f \cdot k_p \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_N, \quad (6.7)$$

kde  $k_f$  je koeficient 1. vypínané fáze,  $k_p$  koeficient překrmitu a  $U_N$  jmenovité napětí vypínané sítě. Vrcholová hodnota  $U_C$  pro ostatní fáze je stejná jako u vypínání blízkého zkratu. Strmost zotaveného napětí se v tomto případě u 1. vypínané fáze je v poměru  $U_{C1f}/U_{C2,3f}$ . Zmíněná proudová závislost je patrná a obrázku 6.4, kde jsou vyobrazeny průběhy zotaveného napětí pro 4 hodnoty vypínaného proudu.



**Obr. 6.4:** Průběhy zotaveného napětí pro svorkový zkrat [Převzato z [1]]

V případě porovnání charakteristik vypínací schopnosti a parametru při vypínání v síti z hlediska vypínacích intervalů. Získáme limitní charakteristiky v určitém místě sítě, které jsou určeny limitním vypínaným proudem. Tento proud určují menší hodnoty kritických proudu pro dielektrický nebo interakční interval.

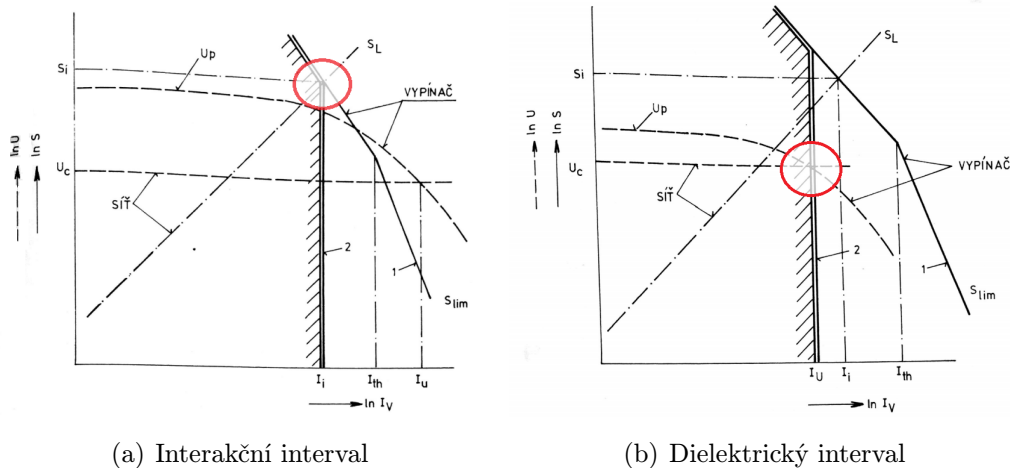
Kritické proudy pro interakční interval  $I_i$  a dielektrický interval  $I_U$  lze určit průsečíkovými závislostmi.

Proud  $I_i$  lze určit z průsečíku průběhu strmosti zotaveného napětí  $S_L = f(I_v)$  a limitní strmosti zotaveného napětí  $S_{lim} = f(I_v)$  jak je patrné na obrázku 6.5 a. Pro vypínače do cca 150[kV] a vypínaného proudu nad 25[kA].

Na obrázku 6.5 b je znázorněno odvození kritického proudu  $I_U$ , který vychází z průsečíku vrcholové hodnotě zotaveného napětí  $U_C = f(I_v)$  a charakteristiky průrazného napětí  $U_p = f(I_v)$ . Platí z pravidla pro vypínače s malým vypínacím proudem nad cca 150[kV].

Na základě stanovených kritických hodnot můžeme provádět korekci parametrů zhášecí komory vypínače (viz. kap 5) případaně volit počet zhášecích komor do série, který zvýší velikost limitu pro vypínací proud pro vypínání blízkého zkratu na vedení. Vzhledem k poměrně malému zvětšení vypínaného proudu se toto řešení víceméně nevyplatí a





**Obr. 6.5:** Limitní charakteristiky s třemi charakteristickými proudy v určených intervalech [Převzato z [1]]

je vhodnější využít jiné způsoby pro zvětšení limitní velikosti vypínaného proudu (*např. tlumící kondenzátor*). Obdobné řešení platí i pro určení koncepce zhašení komory s respektováním rozložení průrazného napětí pro svorkový zkrat. V tomto případě počet komor v sérii ovlivní charakteristiky průrazného napětí zřetelněji, kde se to při vhodné konfiguraci vyplatí což lze vyhodnotit na základě charakteristik určených pro jednotlivé jmenovité hodnoty napětí a počty komor.

## 6.5 Charakteristika vypínací schopnosti vypínače

Porovnáním výše uvedených závislostí dle normy předepsané pro vypínače vzniká **charakteristika vypínací schopnosti vypínače**. Na základě této charakteristiky je možné posoudit kritické disciplíny vypínače (vypínání blízkého a svorkového zkratu) a porovnat je s normalizovanými hodnotami vypínače. Porovnáním zjistíme vypínací schopnost vypínače v daném místě sítě a také i jeho rezervu ve vypínací schopnosti. Názorná ukázka zmíněné charakteristiky je zobrazena na obrázku 6.6 pro vypínač s vypínaným proudem  $I_{VN} = 40[kA]$  a jmenovitým napětím  $U_N = 123[kV]$ .

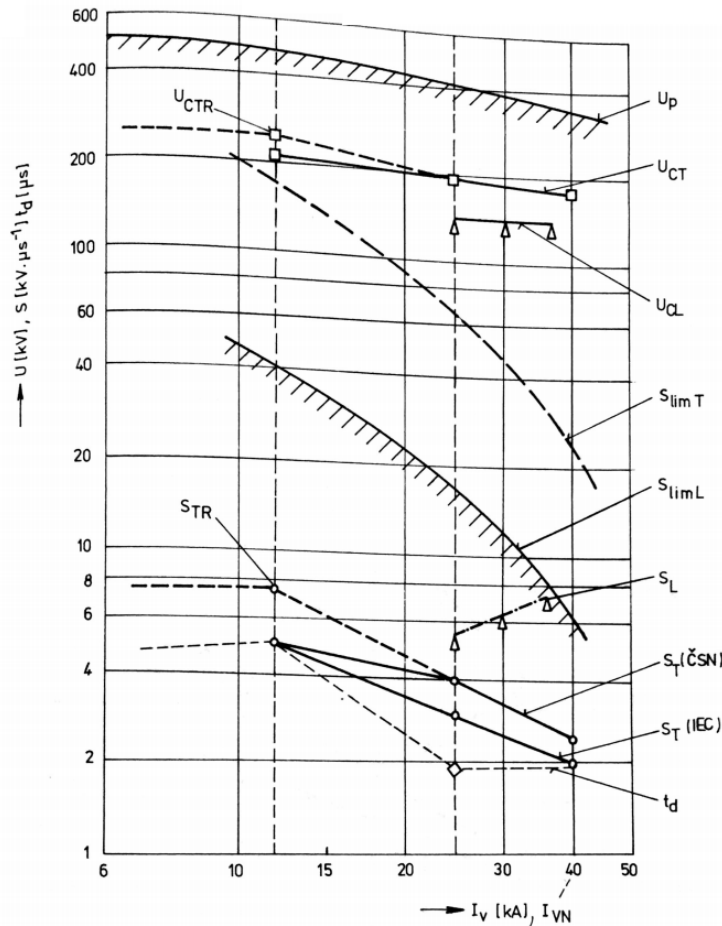
Na hodnocení této charakteristiky se pohlíží z pohledu dvou vypínacích intervalů (*interakčního a dielektrického*). V případně interakčního intervalu je zřejmé, že kritické namáhaní vzniká při vypínání blízkého zkratu na vedení s omezením  $I_V = 0.9I_{VN}$  (značeno  $S_L$  v charakteristice). U ostatních disciplin vidíme podstatně nižší strmotu zotaveného napětí (značeno  $S_T$ ). V případně uvážení vlivu zpoždění  $t_d = 1,5[\mu s]$  a limitní charakteristiky  $S_{limT} = f(I_v)$  je patrné, že vypnutí svorkové zkratu v interakčním intervalu je poměrně snadné. Z charakteristiky je i patrná rezerva která potvrzuje snadné vypnutí v případě svorkového zkratu (porovnání  $S_{limT}$  a  $S_T$ ).

Z pohledu dielektrického intervalu hodnotíme zejména vrcholné hodnoty zotaveného napětí. V tomto intervalu je patrné, že kritickou disciplínou je vypínání svorkového zkratu

pro  $I_V = 0.3I_{VN}$  ( $U_{CTR}$ ). Ostatní případy vypínání svorkového a blízkého zkratu nabývají vzhledem k průraznému napětí  $U_P = f(I_v)$  nižších hodnot vrcholné hodnoty zotaveného napětí ( $U_{CL}$ ,  $U_{CT}$ ). V případě porovnání jde zde vidět opět dostatečná rezerva z pohledu napěťového namáhání v dielektrickém intervalu.

Z výše uvedeného hodnocení a zobrazené charakteristiky vyplývá, že některým kritickým disciplinám je třeba věnovat větší pozornosti a jiné lze zanedbat případně zjednodušit. Toto tvrzení je zohledněno v normách IEC, které udávají zkušební požadavky na vypínače[1].

Vzhledem k tomu, že existuje velmi málo publikací zabývajících se problematikou charakteristik vypínací schopnosti, byla tato kapitola vypracována na základě disertační práce od prof. Vostrackého[1], kde se touto problematikou široce zabýval jak z teoretického tak experimentálního hlediska.



**Obr. 6.6:** Charakteristika vypínací schopnosti překlad pro vypínač VSV 123.3 ( $I_{VN} = 40[kA]$ ,  $U_N = 123[kV]$ ) |Převzato z [1]|

# 7

## Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit vypínací schopnost výkonových vypínačů  $SF_6$ . Daná problematika byla řešena zejména v kapitolách 4, 5, 6. Z práce je patrné, že se rozlišuje mnoho faktorů při vypínacím procesu jak z časového tak prostorového hlediska. Jako zásadní při vypínací schopnosti se považuje limitní strmota zotaveného napětí ( $S_{lim}$ ), o které rozhoduje interakční interval. Dalším rozhodujícím intervalem je dielektrický interval, kde hodnotíme vrcholovou hodnotu zotaveného napětí ( $U_C$ ) a hodnotu průrazného napětí ( $U_P$ ) na základě čehož vyhodnocujeme vypínací charakteristiky vypínače. Uváděné parametry jsou do značné míry ovlivňovány druhem proudění plynu a jeho tlakem v zhášecí komoře.

Postupem doby se výkonové vypínače neustále vyvíjí a přichází se se spousty novinek od nových konstrukcích vypínačů či výměny zhášecího média v tlakoplynových ( $SF_6$ ) vypínacích z ekologických důvodů. Z konstrukčního hlediska vyvinula firma *ORMAZABAL* vypínač spojením technologie *tlakoplynového vypínače  $SF_6$  a vakuového vypínače*. Vypínací proces probíhá na principu vakuového vypínače s izolační vzdáleností kontaktů v ( $SF_6$ ) médiu. Z ohledu vypínací schopnosti tento vypínač zahrnuje výhody obou zmíněných technologií (*vakuového a tlakoplynového ( $SF_6$ ) vypínače*)[8]. Jelikož plyn  $SF_6$  přispívá ke globálnímu oteplování se v poslední době zkouší alternativní plyny, které by byli použity místo plynu  $SF_6$  jako zhášecí médium. Jako nový potenciální elektronegativní plyn pro vysokonapěťové vypínače se v současnosti uvažuje plyn na bázi  $CO_2$  s příměsí tekutiny Novec 4710. Tato směs by měla mít o 98% lepší vliv na globální oteplování s podobnými vlastnostmi plynu  $SF_6$ [9].

Podrobnější zkoumání vypínacích charakteristik a jejich interakce se sítí by se dalo rozvést v navazující práci. Taktéž by se tato práce dala využít jako základ pro návrh modelu zhášecí komory a zkoumání souvislostí s vypínací charakteristikou.

# Literatura

- [1] VOSTRACKÝ, Z. *Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů a jejich užití v praxi* Doktorská disertační práce, ČVUT Praha, FEL - Škoda, Plzeň, 1986.
- [2] BÁRTA, K., VOSTRACKÝ, Z. a kolektiv. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí* Praha: SNTL/ALFA, 1983.
- [3] RUSŇÁK, Š., ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje 1* Plzeň: ZČU v Plzni, 2001.
- [4] SEDLÁČEK, J. *Přednášky z předmětu KEE/EPRE*, FEL ZČU v Plzni, 2015.
- [5] HODLOVÁ M., KOLOUCH P., SCHEJBAL K. *Elektrické přístroje* Plzeň : VŠSE, 1979.
- [6] VAJNAR V. *Rozbor vypínání velkých proudů při nesymetrických zkratech [bakalářská práce]* Plzeň : ZČU FEL v Plzni, 2012.
- [7] HELŠTÝN D., KAČOR P., HYTKA Z. *Elektrické přístroje spínací ochranné a jisticí* OSTRAVA : VŠB, 2003.
- [8] RODRIGUEZ J., AROSTEGUI J., SEBASTIÁN S. *New generation of circuit-breaker switchgear* 2015 CIRED, Lyon, 2015, pp. 0058
- [9] Kieffel Y., Biquez F., Ponchon P., Irwin T. *SF6 alternative development for high voltage Switchgears* 2015 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015, pp. 1-5.