

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Rozbor vypínacího procesu vypínačů VVN / ZVN se  
zaměřením na dielektrický interval**

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na rozbor vypínací schopnosti výkonového vypínače s plynem SF<sub>6</sub>. Zabývá se problematikou vypínacích disciplín při různých typech zkratu a rozebírá intervaly vypínaného oblouku. Další část práce se věnuje obnovení dielektrické pevnosti po uhasnutí oblouku. Výsledkem práce je stanovení závěrů pro navrhování vypínačů.

## **Klíčová slova**

vypínač, plyn SF<sub>6</sub>, zotavené napětí, dielektrický interval

## **Abstract**

This bachelor's thesis is focused on the analysis of switching capacity of the powerful switch with SF<sub>6</sub> gas. It deals with the issue of switching disciplines for different types of short circuit and to analyse the intervals of the switched electric arc. The second part of the thesis is focused on the restoration of dielectric strength after the arc extinction. The result of the thesis is determination of conclusions for the design of switches.

## **Key words**

circuit breaker, gas SF<sub>6</sub>, recovered voltage, dielectric interval

---

## **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.

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

.....

podpis

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Vladimíru Vajnarovi za jeho rady, pomoc a věnovaný čas při vypracování této bakalářské práce.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Václav ČÍŽEK**  
Osobní číslo: **E15B0043P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Rozbor vypínacího procesu vypínačů vvn/zvn se zaměřením na dielektrický interval**  
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. Analyzujte způsob hoření oblouku a přerušení proudu v tlakových vypínačích s plynem SF<sub>6</sub>.
2. Popište vznik spínacího přepětí při různých vypínacích disciplínách.
3. Proveďte rozbor procesu obnovování dielektrické pevnosti po uhasnutí oblouku v závislosti na vypínaném proudu a napěťovém namáhání.
4. Stanovte závěry pro navrhování vypínačů a navrhněte možnosti pokračování studované problematiky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. K. Bárta, Z. Vostracký a kol. - Spínací přístroje velmi vysokého napětí. SNTL, Praha, 1983.
2. Z. Vostracký - Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů a jejich užití v praxi. Doktorská disertační práce, ČVUT Praha - Škoda Plzeň, 1986.
3. O. Havelka - Elektrické přístroje. SNTL, Praha, 1985.
4. Databáze IEEE Xplore Digital Library, CIGRE, apod.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Vladimír Vajnar**

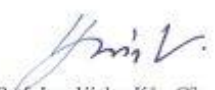
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

**Obsah**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>2</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>4</b>
<b>1. ÚVOD:</b> .....	<b>7</b>
<b>2. SPÍNACÍ PŘÍSTROJE VN/ ZVN</b> .....	<b>8</b>
2.1 VÝKONOVÉ VYPÍNAČE .....	8
2.2 ODPÍNAČE .....	9
2.3 ODPOJOVAČ .....	9
<b>3. ROZDĚLENÍ VYPÍNAČŮ VN/ZVN PODLE ZHÁŠECÍHO MÉDIA:</b> .....	<b>11</b>
3.1 TLAKOVZDUŠNÉ VYPÍNAČE .....	11
3.2 OLEJOVÉ VYPÍNAČE .....	12
3.3 VAKUOVÉ VYPÍNAČE .....	13
3.3.1 <i>Vznik oblouku ve vakuu:</i> .....	14
3.4 VYPÍNAČ S FLUORIDEM SÍROVÝM .....	15
<b>4. VYPÍNAČE S SF<sub>6</sub>:</b> .....	<b>16</b>
4.1 ZHÁŠECÍ KOMORA .....	17
4.1.1 <i>Dvoutlakový systém:</i> .....	17
4.1.2 <i>Systém „puffer type“ :</i> .....	18
4.1.3 <i>Systém „self blast“ :</i> .....	19
4.2 TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI .....	20
4.2.1 <i>Disociace molekul:</i> .....	20
<b>5. VYPÍNAČÍ DISCIPLÍNY:</b> .....	<b>23</b>
5.1 SVORKOVÝ ZKRAT .....	23
5.2 BLÍZKÝ ZKRAT .....	26
5.3 VYPÍNÁNÍ KAPACITNÍCH PROUDŮ .....	30
5.4 VYPÍNÁNÍ MALÝCH INDUKČNÍCH PROUDŮ .....	34
<b>6. INTERVALY VYPÍNANÉHO OBLOUKU:</b> .....	<b>42</b>
6.1 SILNOPROUDÝ INTERVAL .....	43
6.1.1 <i>Zahlcení trysky:</i> .....	44
6.2 INTERAKČNÍ INTERVAL .....	44
6.3 DIELEKTRICKÝ INTERVAL .....	45
<b>7. OBNOVOVÁNÍ DIELEKTRICKÉ PEVNOSTI</b> .....	<b>46</b>
7.1 ZÁVISLOST PRŮRAZNÉHO NAPĚTÍ NA VYPÍNANÉM PROUDU .....	49
7.2 ZÁVISLOST VYPÍNAČÍ SCHOPNOSTI NA VZDÁLENOSTI KONTAKTŮ .....	49
<b>8. ZÁVĚR</b> .....	<b>51</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>52</b>



## Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Máloolejový odpínač s pojistkou VN, typ: H22 SEA - 36,5 kV / 400 A .....</i>	9
<i>Obr. 2 Přípojnicové odpojovače zapnuté na přípojnice.....</i>	10
<i>Obr. 3 Tlakovzdušný vypínač podélné vyfukování – jednoduchá kovová tryska.....</i>	11
<i>Obr. 4 Máloolejový vypínač</i>	
<i>Obr. 5 Řez máloolejového vypínače s vysouvaným roubíkem a) nahoru b) dolů.....</i>	12
<i>Obr. 6 Konstrukční uspořádání vakuového vypínače.....</i>	13
<i>Obr. 7 Vznik oblouku ve vakuovém vypínači .....</i>	14
<i>Obr. 8 Porovnání vlastností vypínače s plynem SF6 a tlakoplynového vypínače stejného typu .....</i>	16
<i>Obr. 9 Řez komorou dvoutlakového vypínače, zapnutý stav .....</i>	17
<i>Obr. 10 Řez komorou dvoutlakového vypínače, stav při vypínání .....</i>	18
<i>Obr. 11 Tlakoplynový vypínač SF6, typ „puffer type“ .....</i>	18
<i>Obr. 12 Tlakoplynový vypínač SF6, typ „self blast“ .....</i>	19
<i>Obr. 13 a) tepelná vodivost dusíku (N2) a fluoridu sírového (SF6) b) Rozdělení křivek teploty oblouku v závislosti na poloměru SF6, pro různé prudy .....</i>	21
<i>Obr. 14 a) Závislost strmosti zotaveného napětí na tlakuvzduchu a SF6 při vypínání 25 kA u jednostranného proudění b) Teplotní rozdělení oblouku v závislosti na poloměru oblouku pro 1 až 4 různé velikosti prudu c) Závislost strmosti zotaveného napětí na velikosti vypínaného proudu při stejném tlaku SF6 u dvojité trysky .....</i>	22
<i>Obr. 15 a) dvouparametrový obvod      b) čtyřparametrový obvod.....</i>	24
<i>Obr. 16 Schéma rozvodné stanice 420/245 kV s označenými místy zkratů (1,2,3 ...)</i>	25
<i>Obr. 17 Průběhy zotavených napětí v místech zkratu .....</i>	25
<i>Obr. 18 Průběh napětí na vedení při zemním zkratu.....</i>	26
<i>Obr. 19 Průběhy vlny na začátku a na konci kontaktu B .....</i>	27
<i>Obr. 20 Průběh zotaveného napětí při vypnutí blízkého zkratu .....</i>	29
<i>Obr. 21 Idealizovaný obvod při vypínání kapacitních proudů .....</i>	31
<i>Obr. 22 Idealizovaný průběh při vypnutí kapacitních proudů .....</i>	31
<i>Obr. 23 Obvod při vypínání kapacitních proudů s uvažovanou indukčností .....</i>	32
<i>Obr. 24 Průběhy vypínání kapacitního obvodu s indukčností.....</i>	32
<i>Obr. 25 Vypínání kapacitního obvodu při průrazu kontaktní dráhy s výsledným zotaveným napětí .....</i>	33
<i>Obr. 26 Obvod při vypínání malých induktivních proudů u transformátoru naprázdno ....</i>	35
<i>Obr. 27 Průběhy napětí a proudu na kontaktech a zániku proudu v nulové hodnotě při vypínání transformátoru naprázdno .....</i>	36
<i>Obr. 28 Průběhy napětí a proudu na kontaktech a zániku proudu před nulovou hodnotou</i>	

<i>(fiktivní případ)</i> .....	37
<i>Obr. 29 Průběhy napětí a proudu oblouku s opakovanými průrazy kontaktní dráhy při vypínání malého induktivního proudu</i> .....	38
<i>Obr. 30 Průběhy napětí a proudu při vypínání transformátoru naprázdno s opakovatelnými průrazy</i> .....	39
<i>Obr. 31 Průběhy napětí a proudu při vypínání proudů v řádech desítek ampér s opakovatelnými průrazy kontaktní dráhy</i> .....	40
<i>Obr. 32 Průběhy napětí a proudů při vypínání velkých indukčních proudů při uhasnutí oblouku v proudové nule a před proudovou nulou</i> .....	41
<i>Obr. 33 Základní intervaly vypínacího procesu</i> .....	42
<i>Obr. 34 Průchod velkých zkratových proudů</i> .....	43
<i>Obr. 35 Průchod malých zkratových proudů v okolí nulové hodnoty proudu</i> .....	44
<i>Obr. 36 Časový průběh průrazného napětí v dielektrickém intervalu</i> .....	46
<i>Obr. 37 Průběhy intenzity elektrického pole ve zhasací trysce v různých dobách po vypnutí proudu</i> .....	47
<i>Obr. 38 Idealizovaný časový průběh průrazného napětí s vyznačenými fázemi v dielektrickém intervalu</i> .....	48
<i>Obr. 39 a) závislost teploty oblouku na poloměru oblouku b) závislost teploty v ose oblouku na době po vypnutí proudu 30 kA při tlaku 1,4 mPa</i> .....	49

## Seznam symbolů a zkratek

A	tepelná vodivost
$a_r, a_s$	poměrné amplitudy dvou dílčích vlastních kmitočtů dané výrazy
AUT	autotransformátor
C, $C_T$ , $C_A$ , $C_B$	kapacita, kapacita transformátoru, kapacita v bodě A, B
$di/dt$	derivace proudu podle času
$di_r/dt$	derivace zbytkového proudu podle času
$D_t$	průměr zhášecí trysky
f	jmenovitá hodnota kmitočtu
$f_0$	vlastní úhlová frekvence
G	generátor
$h_t$	vzdálenost hrdla trysky
i	proud
$I_C, i_C$	efektivní a okamžitá hodnota proudu kapacitoru
$I_G, i_G$	efektivní a okamžitá hodnota proudu generátoru
$I_L, i_L$	efektivní a okamžitá hodnota proudu induktoru
$i_r$	zbytkový proud
$I_T, i_T$	efektivní a okamžitá hodnota proudu transformátoru
$I_{us}$	hodnota proudu v čase $t=0$
$I_V$	vypínaný proud
l	délka vedení
L, $L_T$ , $L_A$ , $L_B$	indukčnost, indukčnost transformátoru, indukčnost v bodě A, B
n	n-tý násobek
$N_2$	dusík
p	tlak vzduchu
$p_{\bar{r}}$	překmit
$r/R, r, r_a$	poloměr oblouku
$r_t$	poloměr zhášecí trysky
$R_Z$	odpor vedení
S	strmost zotaveného napětí
s	poměrná strmost napětí
SF6	fluorid sírový
SCH	studená charakteristika

---

St	průřez hrdla trysky
S <sub>ZOT</sub>	strmost zotaveného napětí
t	čas
t <sub>a</sub>	doba hoření oblouku
t <sub>d</sub>	dielektrický interval
t <sub>i</sub>	interakční interval
TR	transformátor
t <sub>s</sub>	silnoprúdový interval
u <sub>a</sub>	napětí oblouku
U <sub>A</sub> , U <sub>B</sub> , U <sub>AB</sub>	napětí v hodnotě A, B, mezi body AB
U <sub>C</sub> , u <sub>C</sub>	efektivní a okamžitá hodnota napětí kapacitoru
U <sub>G</sub> , u <sub>G</sub>	efektivní a okamžitá hodnota napětí generátoru
U <sub>L</sub> , u <sub>L</sub>	efektivní a okamžitá hodnota napětí induktoru
U <sub>M</sub>	maximální hodnota napětí
U <sub>O</sub>	napětí zdroje
u <sub>ob</sub>	obnovené napětí
U <sub>ob</sub>	amplituda obnoveného napětí
U <sub>P</sub>	průrazné napětí
U <sub>R</sub> , U <sub>S</sub>	skutečné amplitudy obou vlastních kmitočtů
U <sub>T</sub> , u <sub>T</sub>	efektivní a okamžitá hodnota napětí transformátoru
U <sub>zh</sub>	zhášecí amplituda napětí
u <sub>ZN</sub>	zotavené napětí
U <sub>zn max</sub>	maximální hodnota zotaveného napětí
u <sub>zn</sub>	zotavené napětí
v	rychlost světla
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
We	energie
X <sub>L</sub>	reaktance vedení
z	vzdálenost kontaktů
Z	vlnová impedance vedení
z <sub>K</sub>	maximální vzdálenost kontaktů
z <sub>k</sub>	zdvih kontaktu
ZVN	zvláště vysoké napětí

---

$\alpha$	součinitel tlumení přechodové složky
$\Theta$	teplota okolního plynu
$\Theta_1$	teplota
$\Theta_d$	disociační teplota
$\Theta_z$	zápalná teplota
$\Delta t_u$	doba od průchodu nulou do okamžiku protnutí tečny obalující křivku $u_{zn}$ v hodnotě $U_{zn \max}$ okamžitá strmost zotaveného napětí v nulové hodnotě proudu

## 1. Úvod:

Vývoj spínacích přístrojů v elektrotechnice se za poslední desítky let začal velmi vyvíjet, zvláště pak vypínače s fluoridem sírovým (SF<sub>6</sub>). Veškerý vývoj se zaměřoval a nyní zaměřuje na vyšší požadavky úspěšného vypnutí. Zejména vyšší požadavky na vypínací schopnosti, ale i časové závislosti vypínací schopnosti a bezpečnost. Práce se zaměřuje na analyzování pochodů v tlakoplynovém vypínači s plynem SF<sub>6</sub> a jeho konstrukci.

Spínací přístroje jsou dnes nezbytnou záležitostí pro spolehlivý a bezpečný chod elektrizační soustavy. Spínací přístroje můžeme rozdělit do několika skupin dle jejich spínacích schopností.

V první části práce se nachází obecné rozdělení spínačů na výkonové vypínače, odpínače a odpojovače, jejich rozdělení a krátký popis jednotlivých spínačů. Tato část dále obsahuje charakteristiku konkrétních druhů vypínačů VN až ZVN dle zhasacího média, které mohou být tlakovzdušné, olejové, vakuové, tlakoplynové s SF<sub>6</sub> apod., kde jsou jednotlivé vypínače popsány podrobněji. Tlakoplynové vypínače s SF<sub>6</sub> mají samostatnou kapitolu, ve které se popisují různé druhy zhasacích komor, od prvotní dvoutlakové, po systémy „self blast“ a „puffer type“.

Druhá část práce zkoumá různé vypínací disciplíny z pohledu zkratů a proudů. Podrobné rozepsání svorkového zkratu, blízkého zkratu, vypínání kapacitních a induktivních proudů a základní problematiky týkajících se těchto poruch. Je zde zmíněný takzvaný jev zahlcení trysky. Dále jsou zde popsány intervaly vypínaného oblouku, které jsou silnoproudý, interakční a dielektrický interval.

Třetí část přemostuje z dielektrického intervalu rovnou k obnovování dielektrické schopnosti, jejich fází a závislosti průrazného napětí na vypínaném proudu, na který je kladen důraz jako stěžejní problematika bakalářské práce. Poslední bod je shrnutí celé problematiky tlakoplynových vypínačů s SF<sub>6</sub>.

## 2. Spínací přístroje VN/ ZVN

### 2.1 Výkonové vypínače

Výkonové vypínače jsou rychlé spínací prvky, které mají vlastní pohon a jsou schopny vypnout zkratové proudy. Navíc dokáží i zapnout do zkratu. Nalezneme je v soustavách VN, VVN. Jedinou nevýhodou vypínače je, že neumožňuje viditelné odpojení vodivých částí. Ve vypínači po vypnutí a oddalování kontaktů dojde ke vzniku oblouku. Vzniklý oblouk při vypnutí můžeme zhasět několika způsoby. Například u máloolejového vypínače oblouk zhasíme utopením v oleji a působením olejových par, tlakovzdušný vypínač sfouknutím oblouku, vypínač s fluoridem sírovým pak nevodivým plynem. Rozbor jednotlivých způsobů zhasení oblouku je vysvětlen v kapitole 3. Po uhasnutí oblouku některým z uvedených způsobů dojde k vypnutí proudu. [2,8]

Oblouk můžeme přerušit několika způsoby:

- natažením oblouku,
- rozsekáním oblouku,
- zchlazením oblouku,
- odvedení ionizovaných částic.

Pohon vypínačů může být:

- stlačený vzduch,
- střadačový pohon,
- elektromotor,
- stlačený vzduch,
- hydraulicky,
- ručně.

- trojpólové (pohon tří pólů současně)
- jednopólové (pohon jednotlivých pólů)

Podle provedení můžeme rozdělit:

- venkovní
- vnitřní
- zapouzdřené

## 2.2 Odpínače

Odpínače nalezneme na hladinách VN a můžeme s jejich pomocí spínat (zapínat i vypínat) zátěže a zapínat zkratové proudy. Nelze s nimi ale zkratové proudy vypínat. Většinou se umísťují v kombinaci s VN pojistkou, která při případné poruše přeruší vadnou fázi. [2,8]

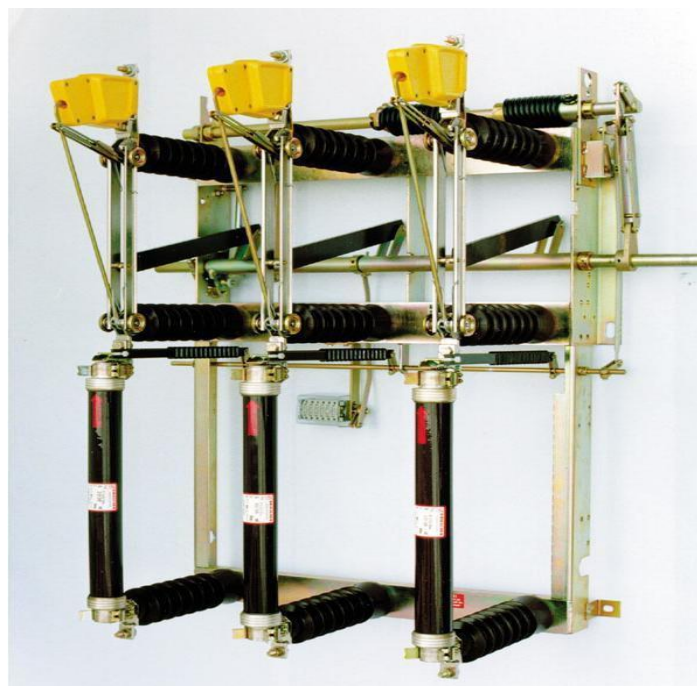
Lze je rozdělit do několika skupin:

Podle principu zhášení:

- tlakovzdušné s vlastní výrobou stlačeného vzduchu
- plynotvorná hmota
- s malým množstvím oleje
- s vakuovou trubicí

Podle pohonu:

- nejčastěji střadačový pohon



Obr. 1 Máloolejový odpínač s pojistkou VN, typ: H22 SEA - 36,5 kV / 400 A [Převzato z[8]]

## 2.3 Odpojovač

Odpojovače se používají na hladinách VN, VVN a slouží k bezpečnému a především viditelnému odpojení dvou vodivých částí. Většinou je nalezneme v kombinaci s výkonovými vypínači. S odpojovači lze spínat obvody, ale bez zatížení. Nemůžeme je použít pro zhášení oblouku. [2,8]



Můžeme je rozdělit do několika hledisek:

Podle provedení:

- nožové,
- posuvné,
- vyklápěcí,
- otočné rameno,
- pantografový.

Podle počtu pólů:

- jednopólové,
- třípólové.

Pohle pohonu:

- tlakovzdušný,
- elektromotor,
- ruční.

Podle uzemnění:

- bez zemního nože,
- se zemním nožem.

Další druhem odpojovače je úsečník, který je umístěn na sloupu vedení VN. [2,8]

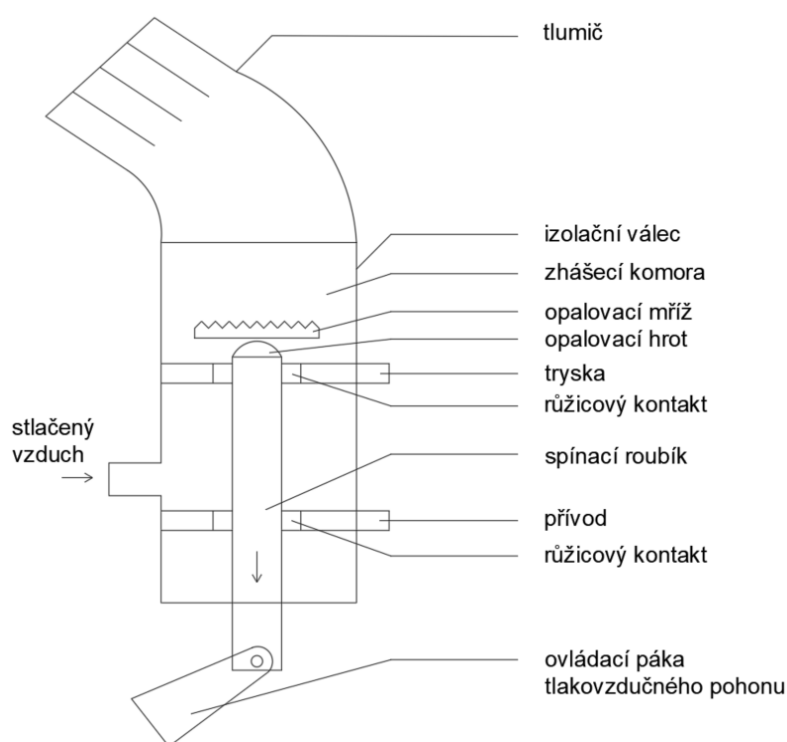


Obr. 2 Přípojnicové odpojovače zapnuté na přípojnice [Převzato z[8]]

### 3. Rozdělení vypínačů VN/ZVN podle zhášecího média:

#### 3.1 Tlakovzdušné vypínače

Již dle názvu můžeme s jistotou určit prostředí, ve kterém dochází k zhášení oblouku tlakovzdušného vypínače a tím je stlačený vzduch. Proto musíme mít u vypínače i zásobník stlačeného vzduchu a kompresor, který bude dodávat stlačený vzduch do zhášecí komory. Stlačený vzduch zde kromě odfouknutí oblouku slouží také k pohybu roubíku. Máme dva typy, jak lze sfouknout oblouk. Prvním typem je podélně v trysce a druhým příčně ve štěrbině. Příčné sfoukávání oblouku se nepoužívá i přes velké výhody, jako je sfoukávání velkých proudů a velká účinnost, ovšem je zde zapotřebí velké množství vzduchu. [1]



Obr. 3 Tlakovzdušný vypínač podélné vyfukování – jednoduchá kovová tryska

Obrázek 3 ukazuje základní uspořádání tlakovzdušného vypínače. Stlačený vzduch se nachází v místě pod tryskou a roubík zamezuje proudění vzduchu do zhášecí komory. Jakmile se ovšem roubík mechanickým způsobem posune dolů, dojde k otevření zhášecí komory a vzduch může proudit proti směru působení roubíku, a to směrem nahoru. Při vypínání působí vzduch a roubík stejným směrem. Při vzniku oblouku dochází k proudění vzduchu přes oblouk a ochlazuje jej a zároveň posune oblouk, který se nachází mezi tryskou a opalovacím kontaktem, na místo opalovacího kontaktu a stěny zhášecí komory. Vypnutí můžeme považovat za úplné vzhledem k podmínce, že průrazné vrstvy vzduchu musí být vždy vyšší, než je hodnota zotaveného napětí. Pro představu velikosti tlaku vzduchu může

dosahovat například 1,2 – 6,4 MPa a vzduch může tryskat až rychlostí 340 m/s. [1,3,4]

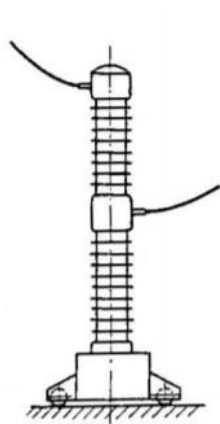
Každé zhášedlo musíme nadimenzovat na napěťové a proudové schopnosti. Při dimenzování proudu musíme zajistit, aby nenastal jev zvaný *zahlcení trysky*, který může způsobit zabránění proudění vzduchu tryskou. Díky tomu se nesfoukne oblouk, který přetrvá a vypínač selže. [1,3,4]

Dnes se pro lepší účinnost používá jednoduchá kovová tryska s protielektrodou, dvojitá kovová tryska (protiproudá, souproudá) nebo izolační tryska (jednoduchá či dvojitá). [1,3,4]

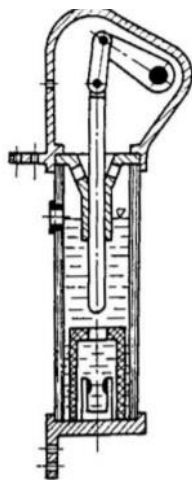
### 3.2 Olejové vypínače

První olejové vypínače byly tzv. kotlové, vzhledem k vývoji, výzkumu a větším požadavkům na vypínací pochody se tento typ již nevyužívá. Přešlo se proto na typ máloolejových vypínačů. Kapalinové neboli olejové vypínače pracují na způsobu hašení oblouku tak, že při oddálení kontaktů dojde k průchodu kapaliny (v našem případě oleje) obloukem a ke vzniku zplodin hoření. Tyto zplodiny vznikají za velmi krátkou dobu a obklopí hořící oblouk. Teplem dochází k přeměně oleje na plyn a tlak ve zhášecí komoře naroste. Zplodiny mají výhodu v tom, že deionizují prostředí a tím přispívají k hašení oblouku. Neboť vzniklý obloukový plyn převážně tvořen vodíkem má tu schopnost, že má velmi dobrou tepelnou vodivost a tím velmi dobře odvádí teplo. Jakmile proud projde nulovou hodnotou, oblouk zhasne a deionizované prostředí znemožní znovuzapálení oblouku. [1,3,4]

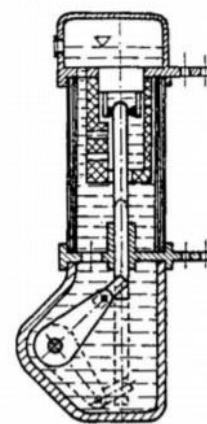
Kapalinové vypínače se nepoužívají k vypínání stejnosměrného proudu. Druhů kapalinových vypínačů bylo za jejich vývoj několik, dnes se však používají převážně máloolejové vypínače a jejich ukázkou vzhledu můžeme vidět na obrázcích 2.2 a 2.3. [1,3,4]



Obr. 4 Máloolejový vypínač



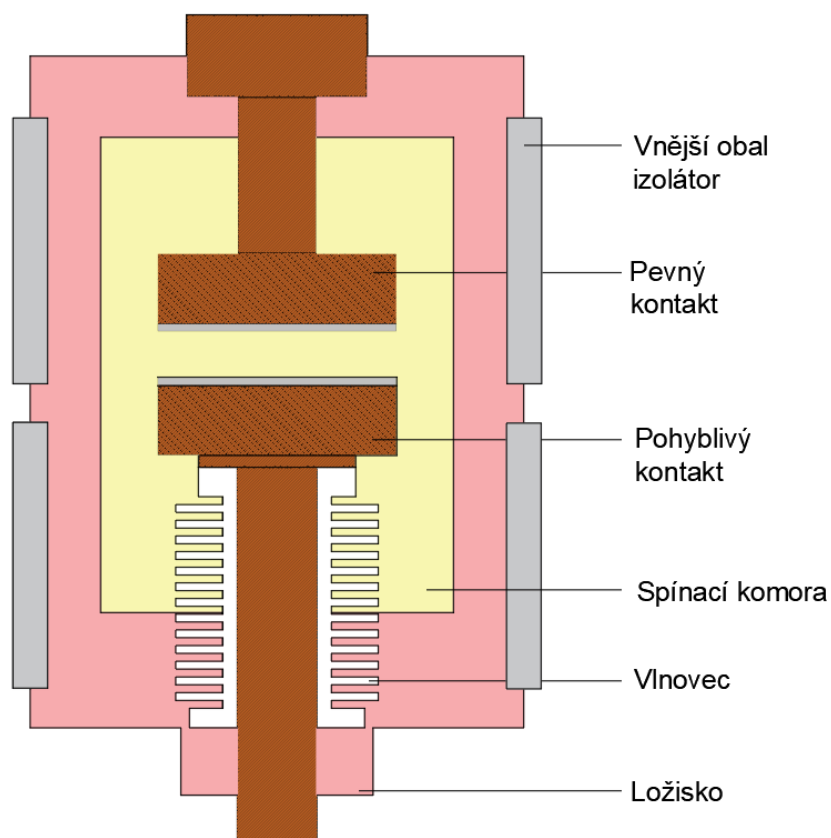
Obr. 5 Řez máloolejového vypínače s vysouváním rouбіkém  
a) nahoru



b) dolů

### 3.3 Vakuové vypínače

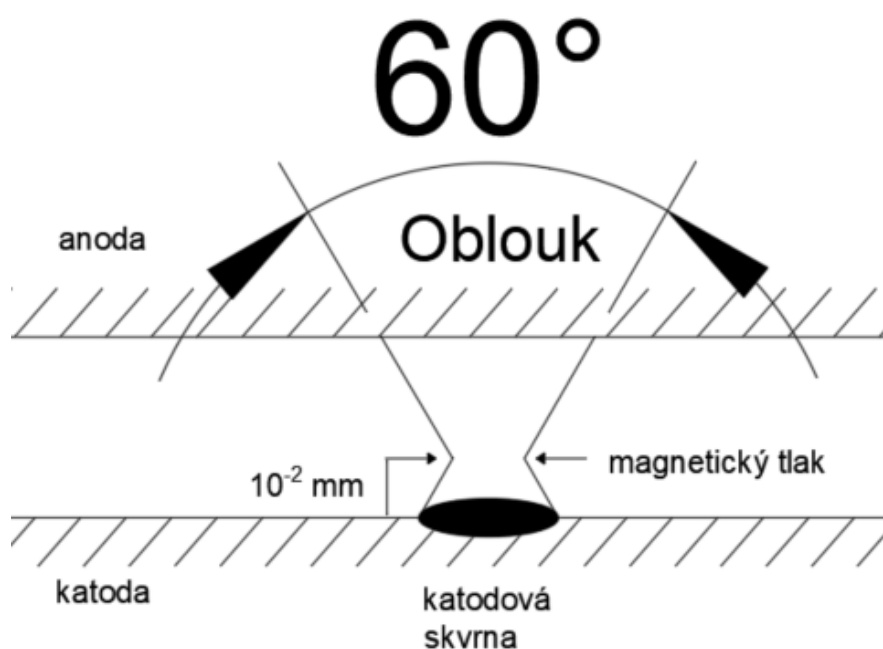
Vakuový vypínač můžeme vidět na obrázku 6. Vakuové vypínače dnes společně s vypínači s fluoridem sírovým (SF<sub>6</sub>) patří do skupiny nejnovějších a nejmodernějších. Dlouholetým vývojem a výzkumem bylo dosaženo zlepšení vakuového zhášení. Kontakty vakuového vypínače se nacházejí ve vakuu pod tlakem mezi 10<sup>-4</sup> až 10<sup>-6</sup> Pa, tudíž můžeme vakuum přirovnat téměř k izolantu. Díky této vlastnosti nemůžeme deionizovat a ani přirovnávat vypínače s vakuem k vypínačům tlakovzdušným a olejovým. Princip vakuových vypínačů je takový, že při vypínání dochází k oddálení pohybového kontaktu od pevného kontaktu na vzdálenost několika jednotek až desítek milimetrů a odpařením kovu mezi plochami kontaktu vznikne oblouk. Vzhledem k teplotě oblouku se odpařenému kovu zvýší tlak a v dalším průchodu proudu nulou expanduje do prostoru. Vakuum má spousty výhod jako je nehořlavost, tichost, minimální opotřebení kontaktů, minimální vzdálenost při oddalování kontaktů, nižší obloukové napětí a nevyfukuje plameny nebo ionizované plyny, naproti tomu je samotné provedení vypínače složité jak z mechanické stránky až po výrobu kontaktů. [1,3,4]



Obr. 6 Konstrukční uspořádání vakuového vypínače

### 3.3.1 Vznik oblouku ve vakuu:

Ve vakuových vypínačích nedochází k hoření oblouku, nýbrž k doutnavému výboji oblouku, který můžeme dle velikosti zařadit do **difuzního** oblouku nebo **vysokotlakého** oblouku. Vznik oblouku nastane krátce po oddálení kontaktů, kdy nejdříve proud protéká několika stykovými body a při postupném oddalování prochází proud pouze jedním místem styku. Místo posledního styku je velmi tepelně namáháno, až do doby, kdy zde dochází k odpařování části kontaktů kovu, které mezi kontakty způsobí ionizaci a přenos proudu. [1]



Obr. 7 Vznik oblouku ve vakuovém vypínači

Na obrázku 7 můžeme vidět vznik oblouku ve vakuu, při kterém se na katodě vytvořila tzv. katodová skvrna, která dodává odpařené části kovů do oblouku. Oblouk má tedy tvar znázorněný na obrázku 7, jehož vrchol je na katodě, kde zůstávají i odpařené části kovů. Velká styková plocha na anodě způsobí malé ohřátí plochy. Katodové skvrny jsou přímo závislé na proudu. Tedy roste-li proud vypínače, zvětšuje se počet katodových skvrn a naopak, klesá-li proud vypínačem, klesá i počet katodových skvrn. Při dostatečném poklesu katodových skvrn dochází ke snížení počtu nosičů náboje a uhasínání oblouku. Při uhasnutí oblouku dojde k rekombinaci částic a následné deionizaci mezi kontakty a rychlému vypnutí. [1]

---

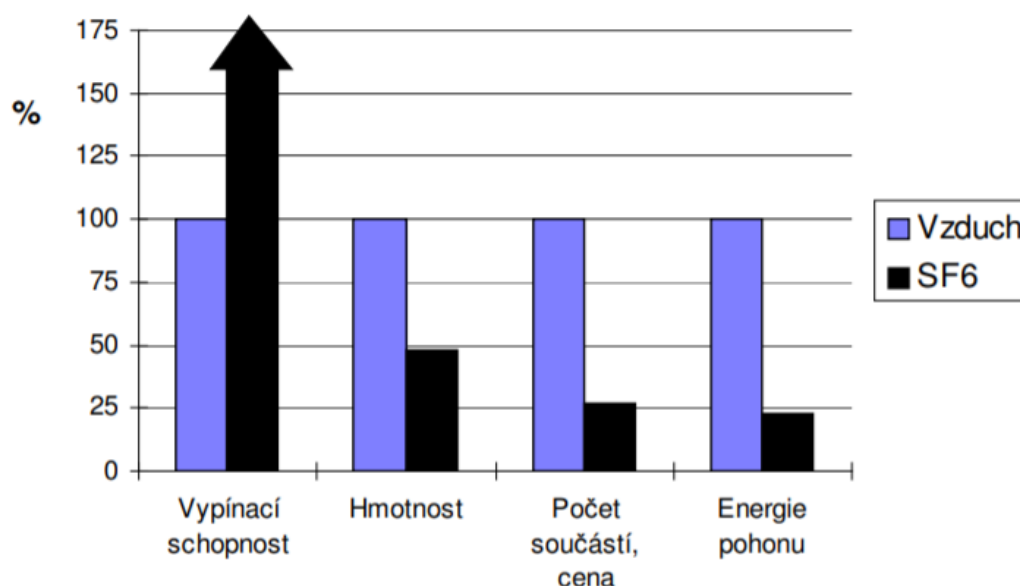
Ovšem pokud hodnota proudu překročí hodnotu zhruba 10 kA, mění se oblouk na vysokotlaký. Velký proud způsobí, že se odpařené části kovů dostanou blíže k anodě, a to vede k jejímu ohřátí a vzniku anodové skvrny. Tento případ vzniklé anodové skvrny je pro nás nežádoucí. Při průchodu proudu nulou nedojde k přerušení proudu a následnému uhašení oblouku. Musíme teda zajistit, aby nedocházelo k vytváření anodových skvrn. To můžeme zajistit například speciální konstrukcí kontaktů, kdy využijeme magnetického pole, které by následný oblouk strhávalo, a tím by se skvrny tvořily na katodě. Magnetické pole může na kontakty působit v několika směrech. Dle směrů ho můžeme řadit na axiální a radiální magnetické pole. [1]

### **3.4 Vypínač s fluoridem sírovým**

Vypínače s fluoridem sírovým neboli SF<sub>6</sub> jsou dnes nejčastěji používanými vypínači. Vypínače s SF<sub>6</sub> si důkladněji rozebereme v kapitole 4.

## 4. Vypínače s SF6:

Vypínače s SF6 (fluorid sírový) jsou tlakové vypínače, které pro zhasnutí elektrického oblouku využívají elektronegativní plyn SF6. K přechodu na plyn SF6 se přešlo vzhledem k rostoucím požadavkům na spínací přístroje a rozvodná zařízení na hladinách VN a VVN, proto se hledaly nové zhaséčské a izolační látky. Ze studie o různých plynných médiích se došlo k závěru, že čistý plyn SF6 je nejpriznivějším médiem, které nejlépe vyhovuje podmínkám jak fyzikálním, chemickým, tak i elektrickým, pro zhasnutí elektrického oblouku. Vypínací schopnost plynu SF6 za poslední desítky let vzhledem k vývoji a výzkumu narůstala. Zejména pak hodnoty napětí a proudů se zvýšily, a to až na proud pohybující se okolo 75 kA a napětí, které se pohybuje kolem 350 kV. Vzhledem k tomuto zlepšení nahradily vypínače s SF6 dosavadní tlakovzdušné a máloolejové vypínače. Příznivé vlastnosti média SF6 vůči médiu vzduchu můžeme vidět na obrázku 8. [1,10]



Obr. 8 Porovnání vlastností vypínače s plynem SF6 a tlakovzdušného vypínače stejného typu [Převzato z [10]]

Vlastnosti čistého plynu SF6 jsou příznivé pro vypínače, vzhledem k velké elektrické pevnosti, nehořlavosti, nejedovatosti, velké chemické stálosti a také výbornými vlastnostmi pro odvod tepla a zhasnutí. [2,10]

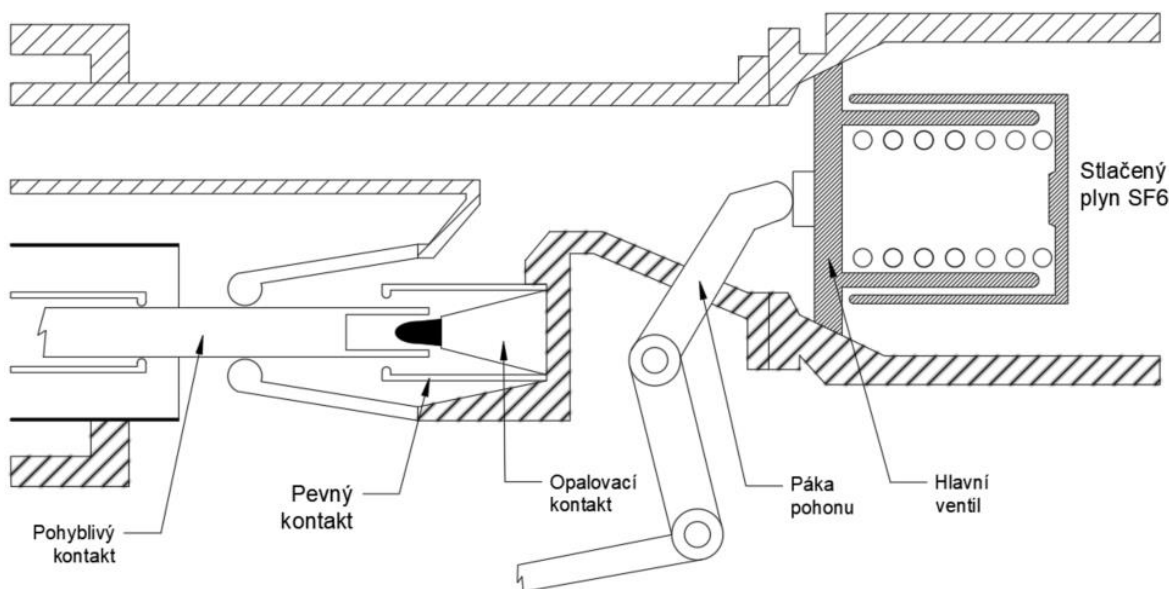
Zhaséčská komora se u vypínačů s SF6 postupem vývoje a výzkumu vytvářela a zanikala, na počátku byl systém dvojtakový, které nahradil systém jednotlaký (tzv. „puffer type“), ze kterého se výhradně přešlo na používání systému „self blast“. Tyto jednotlivé zhaséčské komory si rozebereme v kapitole 4.1. [1,10,11]

## 4.1 Zhášecí komora

Zhášecí komory mohou být podle typu „dead-tank“ nebo „live-tank“, dle umístění. Jak již bylo řečeno v úvodní kapitole 4., zhášecí komora může být zhotovena dvoutlakovým systémem, systémem jednotlakovým „puffer type“ nebo systémem „self blast“. [10]

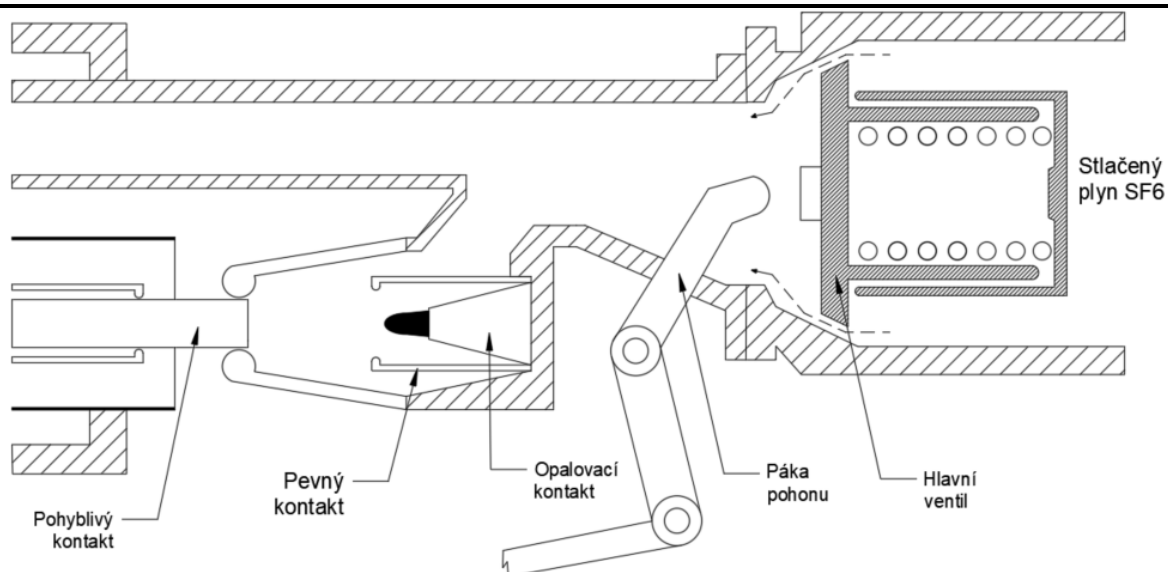
### 4.1.1 Dvoutlakový systém:

Na obrázku 9 a 10 jsou znázorněny dva stavy komory - zapnutý a) a stav při vypínání b). Při zapnutém stavu vidíme, že pohyblivý kontakt je v lamelách pevného kontaktu a okolní tlak je zde nízký. Stlačený plyn SF<sub>6</sub> se nachází v tzv. plynojemu, který se nachází za hlavním ventilem, který je v tomto případě uzavřen. Při stavu vypínání se pohyblivý kontakt oddaluje od pevného a vzniká zde oblouk, který hoří mezi pohyblivým kontaktem a opalovacím kontaktem. Páka pohonu otevře hlavní ventil, který umožní proudění stlačeného plynu SF<sub>6</sub> a postupnému zhášení oblouku. Pro vícenásobné zhášení je nutný kompresor, jenž udržuje stlačený plyn v požadovaném tlaku a plynojem s obsahem SF<sub>6</sub>. Vzhledem k vždypřipravenosti plynu můžeme dosáhnout krátké vypínací doby, ovšem je zde nutné mnoho příslušenství a dále můžeme najít spoustu konstrukčních nevýhod. Vzhledem k náročnosti dvoutlakového systému se přešlo na jednodušší systém, a to jednotlakový. [1,6]



Obr. 9 Řez komorou dvoutlakového vypínače, zapnutý stav

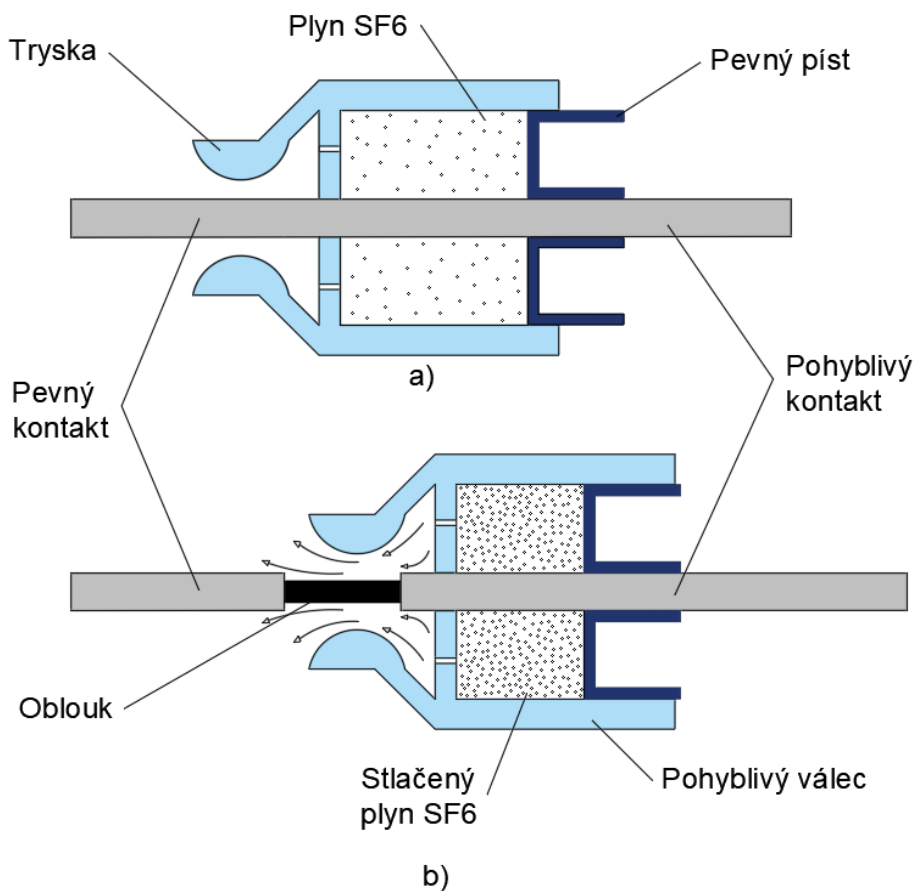




Obr. 10 Řez komorou dvoutlakového vypínače, stav při vypínání

#### 4.1.2 Systém „puffer type“ :

V každém tlakoplynovém vypínači můžeme najít jednu nebo více zhášecích komor. Více zhášecích komor bývá zapojeno do série. U typu „puffer type“ se nachází jedna válcová kompresní komora, ve které je píst zhotovený pro velké zkratové proudy. [10]



Obr. 11 Tlakoplynový vypínač SF6, typ „puffer type“

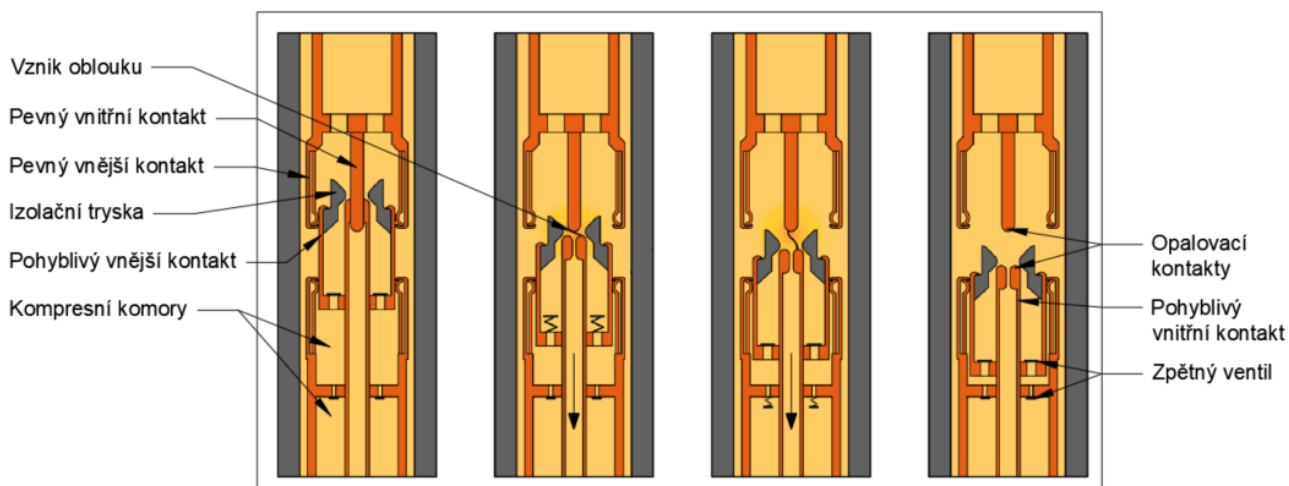
a) Vypínač v zapnuté poloze

b) Vypínání vypínání, hašení oblouku

Na obrázku 11 je znázorněn typ „puffer type“ v řezu s jednotlivými částmi. Píst je zde pevně upevněný, ale válec je pohyblivý. Válec je spřažen s pohyblivým kontaktem, tudíž při oddálení kontaktů se válec spolu s pohyblivým kontaktem pohybuje do možného maxima a zároveň se ve válci stlačuje plyn SF<sub>6</sub>. Stlačený plyn SF<sub>6</sub> proudí tryskou přes elektrický oblouk v axiálním směru (obr. 11b). Poloměr oblouku se postupně snižuje, až se oblouk uhasí. Dielektrická pevnost média mezi oddálenými kontakty se rychle obnovuje. Tlak plynu uvnitř válce se udržuje na určené hodnotě. Vyšší tlak by byl žádoucí směrem ke zvyšující se dielektrické pevnosti, ovšem plyn SF<sub>6</sub> s rostoucím tlakem kapalní. Zkapalnění plynu je velmi nežádoucí, protože takový to plyn, respektive kapalina, ztrácí schopnosti zhášení oblouku. [10,11]

#### 4.1.3 Systém „self blast“ :

Využívá energii vlastního elektrického oblouku pro vytvoření spádu plynu, který se využívá na chlazení oblouku. U „self blast“ se používají dvě zhášecí komory, první zhášecí komora neobsahuje píst, je řešena na velké proudy a je zhotovena na proudění plynu oběma směry. Tím se zajistí dobré míchání teplého a studeného plynu. Druhá zhášecí komora obsahuje píst a je řešena naopak pro malé proudy. Zde nemůže elektrický oblouk kvůli malé energii vytvořit potřebný tlakový spád. Při vypínání velkých proudů by mezi komorami mohlo dojít k nežádoucí expanzi plynu, a proto je zde bezpečnostní zpětný ventil. Řez systému „self blast“ v jednotlivých fázích systému je znázorněn na obrázku 12. [10,11]



Obr. 12 Tlakoplynový vypínač SF<sub>6</sub>, typ „self blast“,

a) zapnutý stav    b) okamžik vzniku oblouku    c) hoření oblouku    d) úspěšné vypnutí

Na obrázku 12 a) můžeme vidět zapnutý stav, propojení pevných vnějších kontaktů s pevnými pohyblivými, pevnými vnitřními s pohyblivými vnitřními. Ve stavu b) dochází pomocí táhla k vypínání a následné komutace vnější proudové dráhy na vnitřní proudovou dráhu vzhledem k rozpojování vnějších pevných a pohyblivých kontaktů. Po rozpojení posledního dotyku pevného a pohyblivého vnitřního kontaktu dojde ke vzniku elektrického oblouku. Vzniklý elektrický oblouk způsobí ohřátí okolního plynu, což vede k expanzi do kompresní komory a k promíchávání s místním plynem. Se snížením elektrického proudu mezi kontakty se sníží i tlak ve zhášecí komoře a dochází ke spádu a následnému zpětnému proudění plynu z kompresní komory, který začne zhášet oblouk. Oblouk úplně uhasíná při průchodu proudu nulou, ovšem stále dochází k proudění plynu, který zlepšuje schopnosti obnovování průrazné pevnosti. Poté, co jsou pohyblivé kontakty na své maximální dosažitelné vzdálenosti, teplota i tlak jsou vyrovnány a neprochází zde žádný proud, můžeme hovořit o definitivním vypnutí. [10,11]

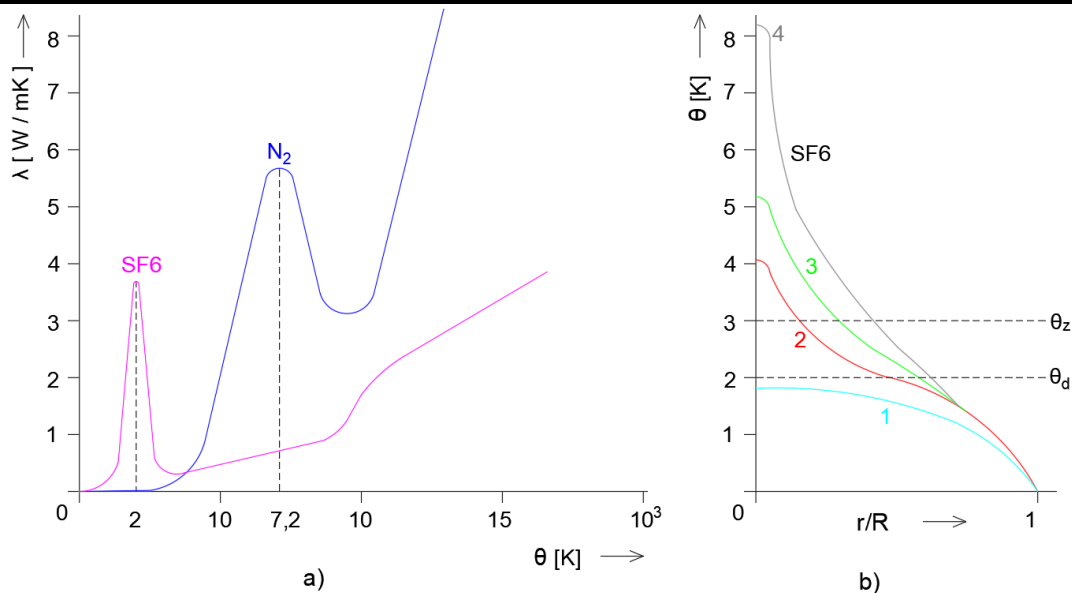
## 4.2 Termodynamické vlastnosti

V tlakoplynových vypínačích se používají plyny vzduch ( $N_2$ ) a SF<sub>6</sub> jako zhášecí médium. Po uhasnutí oblouku zůstává v zhášecí komoře krátkou dobu mezi elektrodami plazma, která obsahuje velké množství volných elektronů. Pokud je množství volných elektronů v rozmezí  $10^{14} - 10^{15}$  elektronů na jeden metr krychlový, pak může docházet k tvorbě elektronových lavin nebo strimérů. Zotavené napětí, které roste strmě, může způsobit jiskrový náboj, který způsobí opětovné zapálení oblouku. Jelikož je v plazmě oblouku hustota elektronů závislá na teplotě, tak zamezení opětovného zapálení oblouku zajistíme rychlým ochlazením plazmy. Chlazení média je možno v závislosti na její tepelné vodivosti, kterou mohou ovlivnit dva jevy: [2]

- a) odvod kinetické energie plynu,
- b) disociace molekul.

### 4.2.1 Disociace molekul:

Disociace molekul může nastat pouze v tzv. *disociační teplotě*  $\theta_a$ , tj. úzký teplotní interval. Křivka tepelné vodivosti má proto definované maximum teploty  $\theta_a$ , které se např. u plynu SF<sub>6</sub> pohybuje okolo hodnoty 2500 K a pro vzduch je tato hodnota 7500 K. [2]



Obr. 13

a) Tepelná vodivost dusíku (N<sub>2</sub>) a fluoridu sírového (SF<sub>6</sub>)

b) Rozdělení křivek teplot oblouku v závislosti na poloměru oblouku SF<sub>6</sub>, pro různé proudy

Obrázek 13 a) znázorňuje tepelnou vodivost plynů SF<sub>6</sub> a N<sub>2</sub> s maximálními hodnotami, které jsou způsobeny disociačními pochody. Z křivek tepelných vodivostí lze odvodit rozdělení teplot v elektrickém oblouku, protože nejmenší tepelný spád se nachází v místě maxima tepelné vodivosti. To má za následek, že se na křivkách teplot oblouku v okolí disociačních teplot  $\theta_{d1}$  a  $\theta_{d2}$  objevují zřetelné zlomy. Na obrázku 13 b) a 14 b) je v křivkách znázorněno rozdělení teplot pro N<sub>2</sub> a SF<sub>6</sub> a zřetelné zlomy pro různé hodnoty proudů. Z křivek lze zjistit dvě rozdílné oblasti oblouku: [2]

- a) vnitřní oblast, s vysokými teplotami ležící nad  $\theta_d$ , která se nazývá *trup oblouku*,
- b) vnější oblast, s teplotami dosahujícími maximálně  $\theta_d$ , nazývaná *plášť oblouku*.

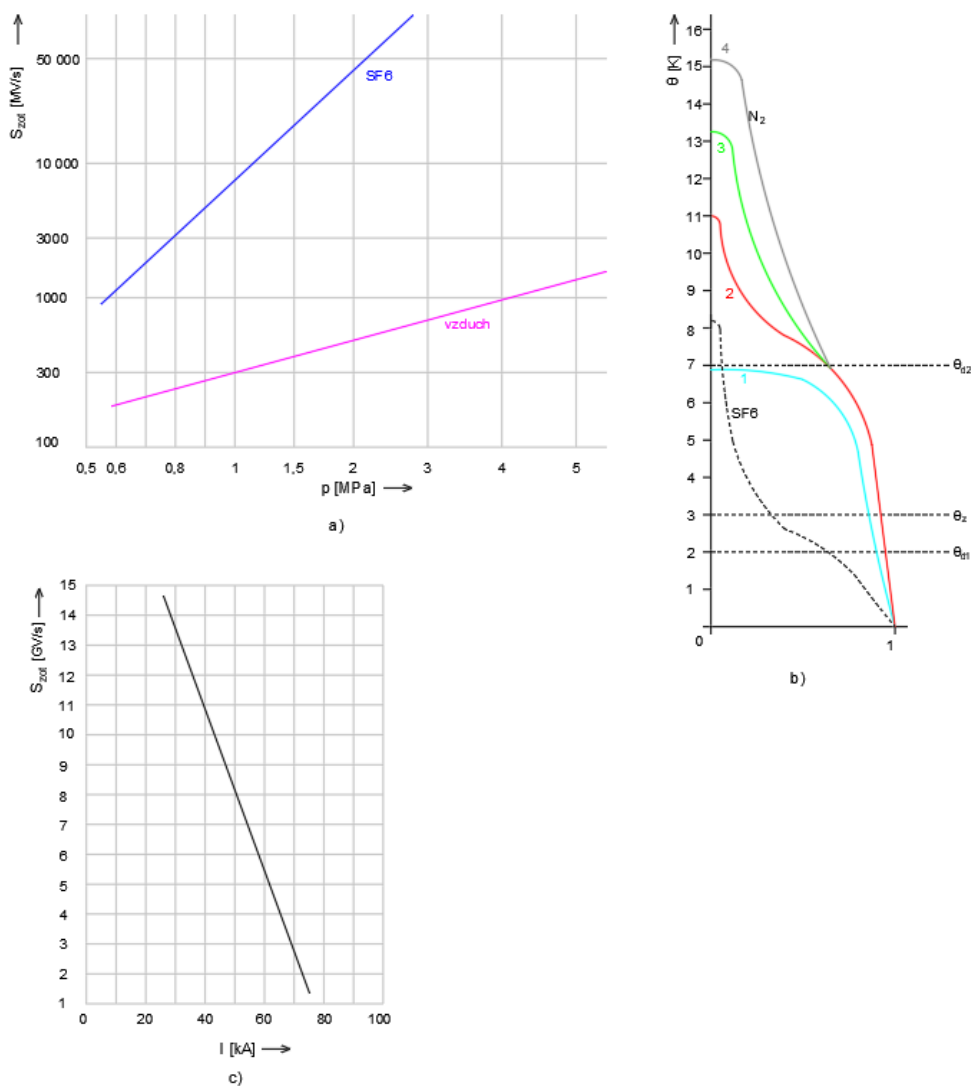
Disociační teplota  $\theta_d$  je důležitá zvláště při rychlosti zmenšování hustoty elektronů v plazmě, neboť plazma je podmínka pro vznik elektrického výboje mezi kontakty. Nejprve zaniká po proudové nule trup oblouku a až poté plášť oblouku, protože v trupu oblouku je úbytek elektronů několiksetkrát větší. Na plášť oblouku působí jen zotavené napětí a elektrony se zmenšují velmi pomalu. Z toho vyplývá, že rozhodující veličinou pro elektrický výboj v plynném prostředí je hustota elektronů. Hustota elektronů má hodnotu přibližně  $10^{14}$  m<sup>-3</sup>, které odpovídá teplota přibližně 3000 K. [2]

Teplota 3000 K se nazývá zápalná a značí se  $\theta_z$ . Z obrázku 13 b) a 14 b) vyplývá, že trup oblouku SF<sub>6</sub> má vždy malý poloměr, kvůli malému rozdílu mezi  $\theta_d$  a  $\theta_z$ . Oproti tomu plyn N<sub>2</sub> má velký rozdíl mezi  $\theta_d$  a  $\theta_z$ , a proto bude mít oblouk velký průměr. Na křivce

oblouku s SF6 nastává zlom u teplotního rozdění v mnohem nižší teplotě než u N2. Díky tomu je zhášecí komora u SF6 o mnoho výhodnější. [2]

Při určování závislosti vypínací schopnosti pro určitý zkratový proud při určitém tlaku a strmosti zotaveného napětí se porovnávají zhášecí schopnosti N2 a SF6. [2]

Na obrázku 14 a) jsou zakresleny charakteristiky při vypínání proudů 25 kA v plynu SF6 a ve vzduchu a na obrázku 14 c) je znázorněna strmost zotaveného napětí na velikosti vypínaného proudu při stálém tlaku SF6 u dvoustranného proudění. [2]



Obr. 14

- a) Závislost strmosti zotaveného napětí na tlaku vzduchu a SF6 při vypínání 25 kA u jednostranného proudění
- b) Teplotní rozdění oblouku v závislosti na poloměru oblouku ve vzduchu pro 1 až 4 různé velikosti proudu
- c) Závislost strmosti zotaveného napětí na velikosti vypínaného proudu při stejném tlaku SF6 u dvojité trysky

## 5. Vypínací disciplíny:

V této kapitole jsou popsány průběhy zotavených napětí v síti. Vlastní kmitočet sítě ovlivní ideální průběh zotaveného napětí při zkratech. Při výpočtech zotaveného napětí se vždy uvažuje, že vypínač má tyto vlastnosti: [2]

Při hoření oblouku je napětí oblouku nulové, po uhasnutí oblouku se odpor vypínací dráhy blíží skokově k nekonečné hodnotě. Ovšem ve skutečnosti má vypínač velké napětí na oblouku, které deformuje zkratový proud před jeho nulovou hodnotou proudu. To vede k neskokové změně izolačního odporu. Tato neskoková změna je dána druhem vypínače. Vypínací schopnosti vypínačů se určují z ideálních průběhů zotaveného napětí. [2]

Různé průběhy zotavených napětí v sítích jsou závislé na druhu zkratu. Každý druh zkratu má jiné vlastnosti a jinak ovlivňuje průběh zotaveného napětí. [2]

### 5.1 Svorkový zkrat

Svorkový zkrat nastává v těsné blízkosti svorek vypínače a má nejvyšší hodnoty zkratového proudu. Důvodem je velmi malá impedance obvodu. Při výpočtu ideálního zotaveného napětí se generátory, transformátory a samotné vedení nahrazuje prvky indukčnosti a kapacity. Za jejich pomoci se sestaví náhradní obvod. Z náhradního obvodu můžeme dopočítat vlastní kmity přechodné složky zotaveného napětí a počet překmitů. Náhradní obvod můžeme mít dvouparametrový nebo čtyřparametrový. Na obrázku 15 a) je znázorněn dvouparametrový obvod a jeho průběh zotaveného napětí  $u_{zn}$  lze vyjádřit pomocí vztahu (1) [2,12]:

$$u_{zn} = u_{ob}(1 - e^{\alpha t} \omega_0 t) \quad (1)$$

kde:

$\alpha$  součinitel tlumení přechodné složky

$\omega_0$  vlastní úhlová frekvence

pro vlastní úhlovou frekvenci  $\omega_0$  platí vztah:

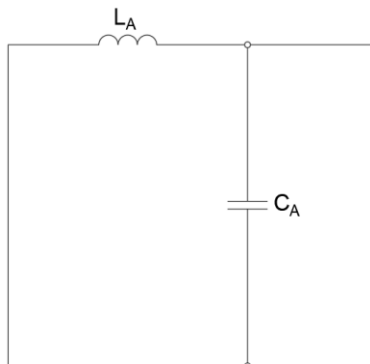
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_A \cdot C_A}} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} [\text{Hz}] \quad (3)$$

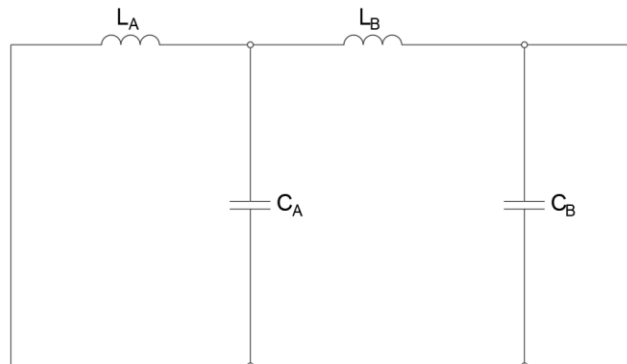
Počáteční strmost zotaveného napětí je největší a tudíž nejdůležitější pro vypínání. V praxi se v bezporuchovém stavu velmi těžko určuje strmost zotaveného napětí  $u_{zn}$ , proto se provedlo mnoho pokusů pro získání poměru mezi vypínaným proudem a  $I_v$  a počáteční strmostí. Došlo se k závěru, že tato závislost je nepřímě úměrná (tabulka 1). [2,12]

Tab. 1 - Hodnoty počáteční strmosti  $u_{zn}$  pro různé hodnoty proudu  $I_v = 40$  kA vypínače SF6 [Převzato z 12]

Vypínací proud $I_v$	30 % $I_v$	60 % $I_v$	100 % $I_v$
Strmost	5 kV/ $\mu$ s	3 kV/ $\mu$ s	2 kV/ $\mu$ s



Obr. 15 a) dvouparametrový obvod



b) čtyřparametrový obvod

Pro čtyřparametrový obvod z obrázku 15 b) je průběh napětí  $U_{zn}$  dán rovnicí (4):

$$U_{zn} = U_{ob}[a_R(1 - \cos\omega_R t) + a_S(1 - \cos\omega_S t)] \quad (4)$$

kde:

$\omega_R, \omega_S$  úhlové frekvence vlastních kmitů

$a_R, a_S$  poměrné amplitudy dvou dílčích vlastních kmitočtů dané výrazy

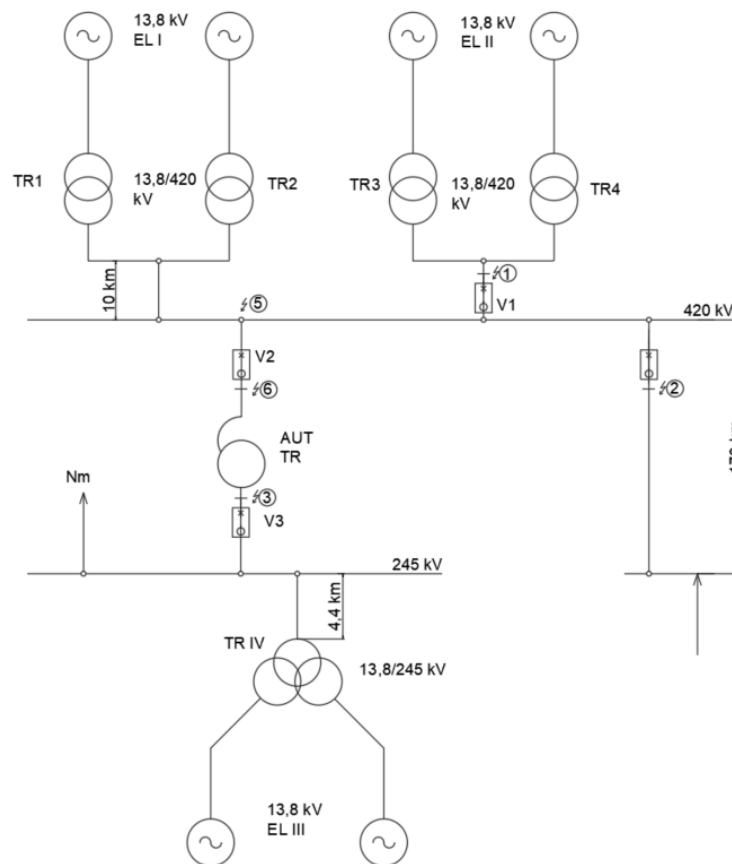
$$a_R = \frac{U_R}{U_{ob}}; \quad a_S = \frac{U_S}{U_{ob}}$$

kde:

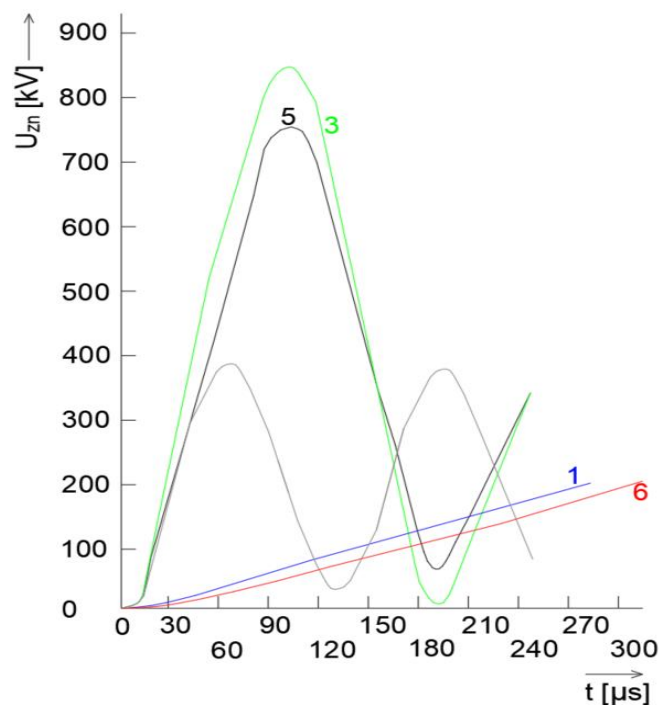
$U_R, U_S$  skutečné amplitudy obou vlastních kmitočtů

$U_{ob}$  amplituda obnoveného napětí

Vypočtené hodnoty průběhů zotaveného napětí jsou velmi důležité pro navrhování VVN stanic, kdy zde kontrolujeme místa s možnými odchylkami průběhu zotaveného napětí. Na obrázku 16 a 17 je znázorněn fakt, že každé místo obsahuje jinou velikost a různou strmost zotaveného napětí  $U_{zn}$ . [2]



Obr. 16 Schéma rozvodné stanice 420/245 kV s označenými místy zkratů (1,2,3 ...)



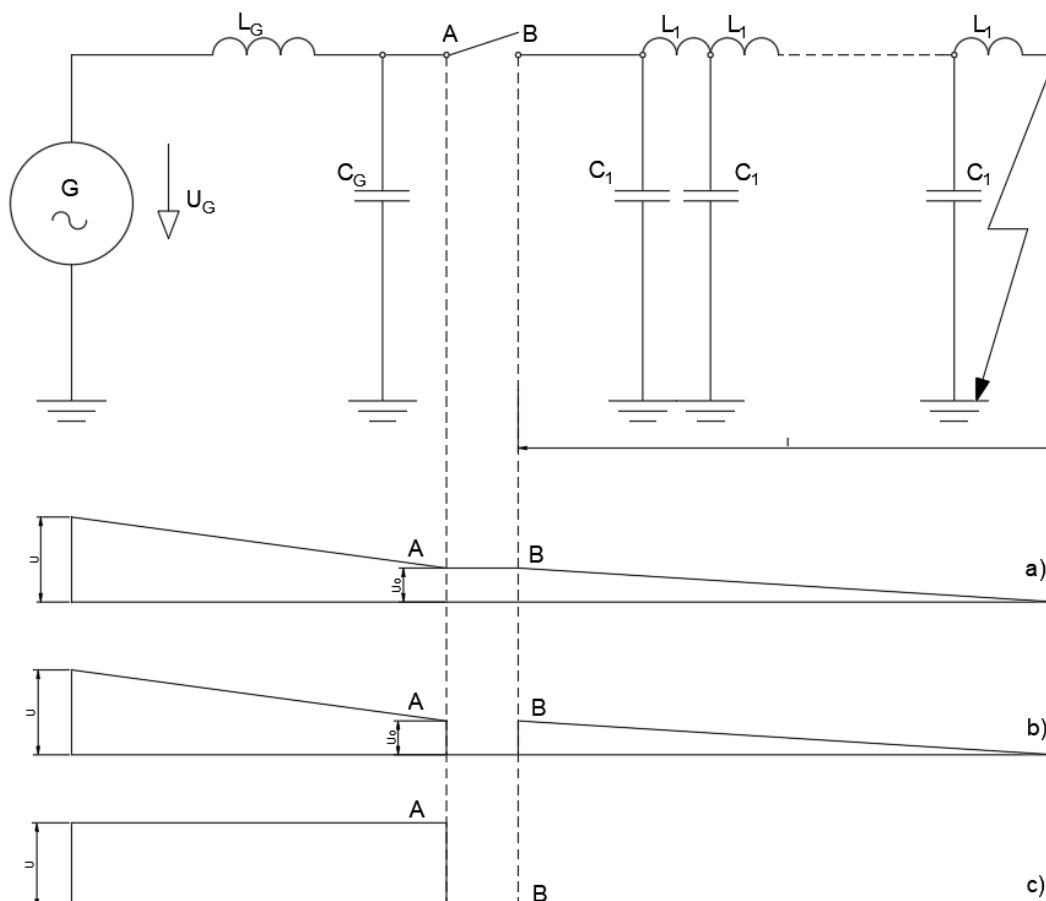
Obr. 17 Průběhy zotavených napětí v místech zkratu

Obrázek 17 znázorňuje strmost  $U_{zn}$  v místech zkratu. V místě 1 dosahuje hodnoty 0,7 kV/ $\mu$ s, v místě 3 pak 7,2 kV/ $\mu$ s, v místě 5 nabývá hodnoty 6,6 kV/ $\mu$ s a v místě 6 ji náleží hodnota 0,67kV/ $\mu$ s. [2]



## 5.2 Blízký zkrat

O blízkém zkratu uvažujeme jako o zemním zkratu na homogenním vedení v krátké vzdálenosti (respektive jednotky kilometrů). Jedná se o malou vzdálenost, i přesto jí zde musíme respektovat. Vzhledem k předpokládanému venkovnímu homogennímu vedení víme, že naše vedení je tvořeno stejnými (kvůli malé vzdálenosti) sériovými indukčnostmi  $L$  a stejnými paralelními kapacitami  $C$ . Schéma vedení je vyobrazeno na obrázku 18, pod kterým jsou znázorněny i diagramy, které ukazují napětí v průběhu zkratu. [1]



Obr. 18 Průběh napětí na vedení při zemním zkratu

Z obrázku 18 je viditelné, že napětí vůči zemi zůstává A a B je označeno jako  $U_0$ . Napětí v krátkém okamžiku po zhasnutí oblouku zůstávají stejná, i když kontakty jsou již rozpojeny vzhledem k přechodovým dějům v obvodu. Tato situace a napětí na ní je znázorněna na diagramu b). Diagram c) ukazuje, že se napětí kontaktu A změnilo na napětí zdroje  $U$ , ovšem na kontaktu B toto již naplatí. Kontakt B ovlivní přechodový jev tak, že jeho hodnota je nulová. Průběh napětí na kontaktu A je dán přechodovým jevem v závislosti na parametrech, indukčnosti  $L_G$  a kapacitě  $C_G$ , mezi ním a napětím generátoru. Při odečtení rozdílu potenciálů kontaktů A a B dostaneme průběh zotaveného napětí na vypínači. [1]

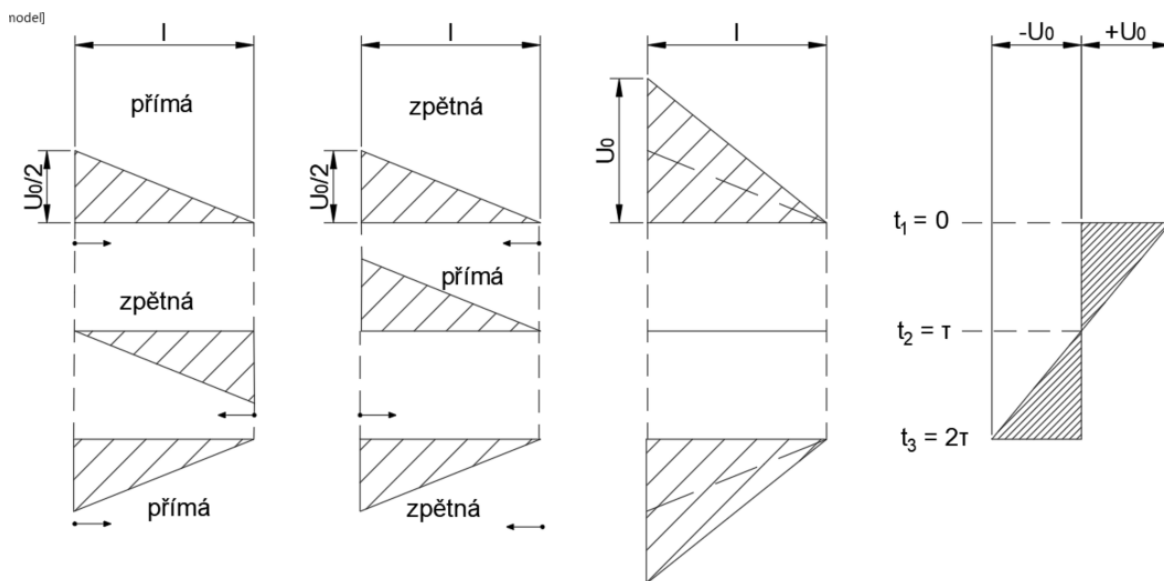
Nyní je rozebrán průběh napětí na kontaktu B. V čase zaniknutí oblouku je na kontaktu B napětí  $U_0$ . Konec vedení je spojen dokrátka, to znamená že, je zde napětí nulové. Tento děj je viditelný na obrázku 18 b). Celý tento děj, od hodnoty napětí  $U_0$  až po nulovou hodnotu

bude trvat  $\tau = \frac{l}{v}$ ,

Kdy:

$l$  je délka vedení

$v$  je rychlost světla,  $v = 3 \cdot 10^8$  m/s. [1]



Obr. 19 Průběhy vlny na začátku a na konci kontaktu B

Na obrázku 19 je znázorněno rozdělení průběhů do časových odvětví a na vlny, které se zde vyskytují. Jsou to vlny přímé a zpětné. Tyto střídavé přímé a zpětné vlny ukazuje první a druhý sloupec. Třetí sloupec znázorňuje součet přímé a zpětné vlny, tzv. výslednou vlnu. V čase  $t_1$  má přímá i zpětná složka stejný směr a velikost amplitudy je  $U_0/2$ , výsledná složka je tedy  $U_0$  a napětí  $u_1$  na konci je nulové. Za dobu  $t_2 = \tau$  se zpětná vlna odráží vzhledem k přímé, aby výsledné napětí bylo nulové. Podobně se tyto vlny opakují s násobky  $t = n \cdot \tau$ . Změny ve všech místech i poklesy napětí jsou lineární v závislosti na čase  $t$  a délce vedení  $l$ . Čtvrtý sloupec ukazuje, že průběh napětí na kontaktu B je tedy dán pilovými kmity s velikostí amplitudy  $U_0$  a kmitočtem  $f_0 = \frac{v}{4l}$ . Velikost amplitudy můžeme zjistit dle velikosti napětí kontaktů oproti zemi v momentě zkratu. Po zjednodušení obvodu můžeme vypočítat velikost  $U_0$  a to vztahem:

$$U_0 = \frac{U \cdot \sqrt{2} \cdot l \cdot L1}{\sqrt{2} \cdot (LG + l \cdot L1)} \quad (1)$$

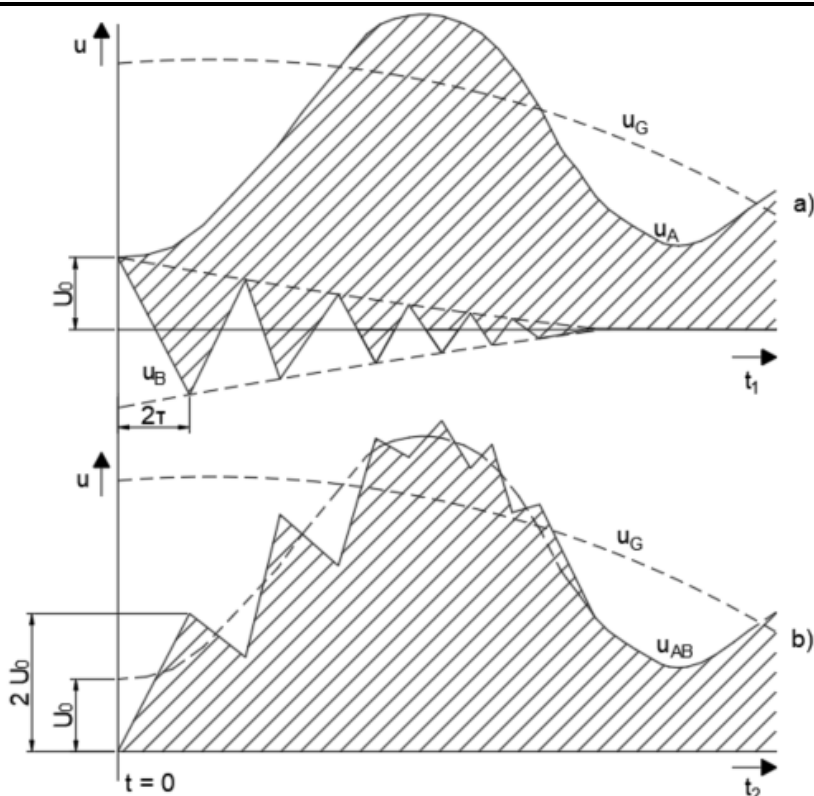
Počet pilových kmitů je dán délkou  $l$  úseku, který je vypínán. [1]

Napětím na kontaktu A vznikne po přerušení proudu přechodový děj, který je ovlivňován parametry obvodu mezi generátorem a vypínačem. Tento průběh napětí a jeho kmitočet je určen parametry indukčnost  $L_G$  a kapacita  $C_G$ . Velikost je dána rozdílem velikostí obnoveného napětí v počátku  $t = 0$  a velikostí napětí na kontaktu A, která je  $U_0$ . [1]

Jak již bylo zmíněno, rozdílem potenciálů můžeme určit výsledné napětí mezi kontakty A a B. Tento děj nalezneme na obrázku 20. Na obrázku a) s osou x času  $t_1$ , je napětí  $u_A$  a  $u_B$ , které se nachází na kontaktech A a B. Na obrázku b) je čas  $t_2$ , kde je rozdíl napětí, které znázorňuje výsledné zotavené napětí při blízkém zkratu. Vlivem činného odporu se amplitudy pilových kmitů s časem zmenšují, až postupně zanikají. Počáteční velikosti amplitud mají velký vliv na celkový průběh zotaveného napětí, ale nejvíce ovlivňují počáteční strmost zotaveného napětí. Při snížení pilových kmitů a zvýšení zotaveného napětí generátorového obvodu se vzhledem k přibližně stejné hodnotě vyruší a první kmit zotaveného napětí  $u_{AB}$  je dáno průběhem netlumeného kmitu, tudíž první amplituda je dvojnásobek hodnoty  $U_0$ , tj.  $2 \cdot U_0$ , které jsme získali z rovnice (1). [1]

Počáteční průběh zotaveného napětí ovlivní pilové kmity jen v případě, že kmitočet pilových kmitů bude vyšší než kmitočet generátorového obvodu. Velikost kmitočtu pilových kmitů, a tím i počáteční strmost zotaveného napětí, ovlivní vzdálenost zkratu. Abnormálně strmý nárůst zotaveného napětí, který vznikne při blízké vzdálenosti, způsobí velké namáhání kontaktů a prostoru mezi nimi. Ihned při zániku oblouku zde zůstává mnoho nosičů nábojů, které jsou tím větší, čím byl větší zkratový proud. Tento proud může dosáhnout 70 % až 90 % velikosti zkratového proudu za vypínačem. [1]

Blízký zkrat má velmi nepříznivé spínací podmínky vzhledem ke spínacím schopnostem vypínače. Nejlépe se s blízkým zkratem dokáže vypořádat vypínač zhašený elektronegativním plynem. [1]



Obr. 20 Průběh zotaveného napětí při vypnutí blízkého zkratu

U nevypnutí blízkých zkratů ve vzdálenosti okolo 0,5 – 3 km od vypínače je v počátku strmý průběh zotaveného napětí způsoben vlastními kmity krátkého vedení. Tento děj je jedním z velkých rozdílů oproti svorkovému napětí. [2]

Při výpočtu zotaveného napětí vedení je základní veličinou napětí  $u_0$ , vzhledem ke známému pochodu blízkého zkratu je dáno, že vrcholová hodnota obnoveného napětí  $U_{ob}$  na straně napájení je napěťový úbytek  $u_0$ , daný reaktancí vedení  $X_L$  a zkratovým proudem  $I_L$ . První vrchol napětí  $u_L$  se dá stanovit z rovnice (2): [2]

$$u_L = p_{\dot{r}} * u_0 \quad (2)$$

kde:

$p_{\dot{r}}$  překmit

Dále můžeme určit strmost zotaveného napětí v závislosti na vypínaném proudu z rovnice (3): [2]

$$\frac{du_L}{dt} = -2\pi * f * Z * I_v * \sqrt{2} = -s * I_L \quad (3)$$

kde:

$s$  poměrná strmost napětí,

$Z$  vlnová impedance vedení,

f jmenovitý kmitočet,

 $I_v$  vypínací proudPoté můžeme dopočítat dobu zkratu  $t_L$  z rovnice (4): [2]

$$t_L = \frac{u_L}{s \cdot I_L} \quad (4)$$

A délku vedení při zkratu L z rovnice (5): [2]

$$L = \frac{1}{2} * c_0 * t_L \quad (5)$$

kde:

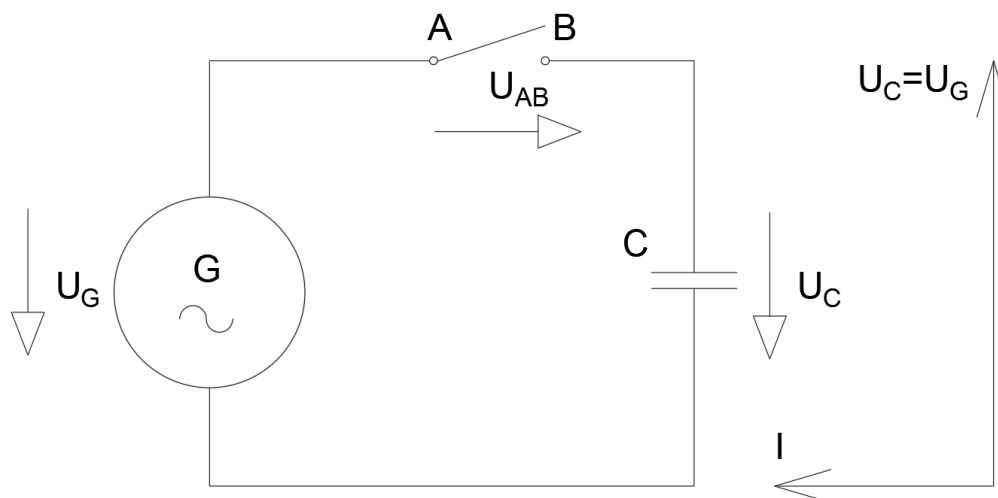
 $c_0$  je rychlost světla =  $3 \cdot 10^8$  m/s

### 5.3 Vypínání kapacitních proudů

Jako vypínání kapacitních proudů můžeme považovat např.: vypínání kondenzátorových baterií, spínání transformátorů naprázdno, vypínání velkých kabelových sítí naprázdno nebo vypínání vzdálených vedení naprázdno. Při vypínání kondenzátorových baterií a velkých sítí naprázdno se setkáme na hladině vysokého napětí (VN), oproti vypínání vzdálených vedení naprázdno, které jsou na hladinách velmi vysokého napětí (VVN) a zvláště vysokého napětí (ZVN). Vypínání kapacitních proudů ovšem nezáleží na velikosti hladiny napětí. Může se však stát, že při vypínání kapacitních proudů dojde k přepětí. Velikost přepětí je již ovlivněna hladinou napětí sítě. [1]

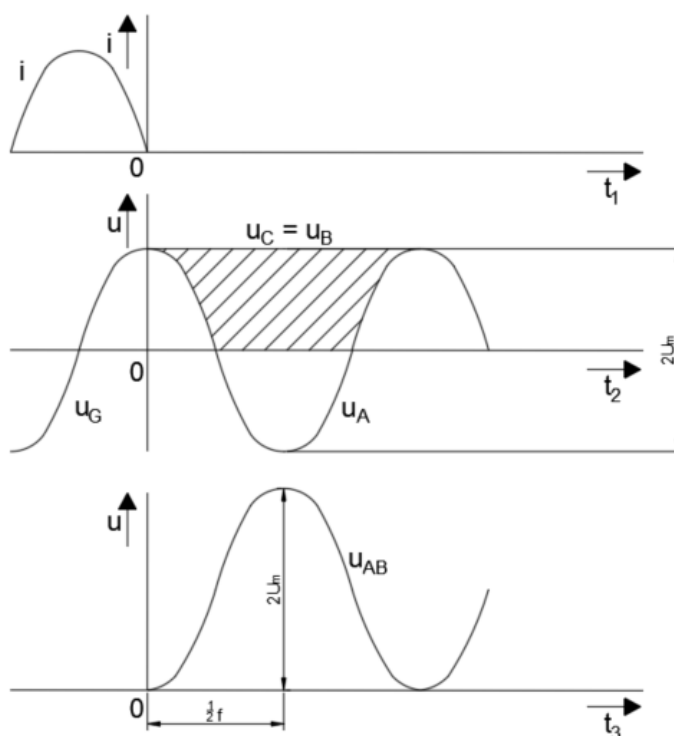
Nejprve je rozebrán průběh idealizovaného kapacitního obvodu, který znázorňuje obrázek 21. Obvod je čistě kapacitní a jsou zde zanedbány složky odporu i indukčnosti. U čistě kapacitního obvodu proud  $I_C$  předbíhá o devadesát stupňů napětí na kapacitě  $U_C$ , který je ve fázi s napětím generátoru  $U_G$ . Při vypínání a postupnému uhasínání oblouku v proudové nule, je kondenzátor plně nabit do maxima napětí zdroje. Po rozpojení obvodu je na kontaktu vypínače B, vzhledem ke kapacitě stále napětí  $U_m$ , ale na kontaktu A se již udržuje kosinusové napětí generátoru  $u_G$ . Mezi kontakty A a B tedy vzniká nárůst napětí, který je roven rozdílu napětí na kontaktech A a B a tedy rozdílu napětí na kapacitoru a na generátoru. Tento děj je vyznačen šrafováním na obrázku 22 při čase  $t_2$  a je přenesen do samostatného grafu při čase  $t_3$ . Tento výsledný rozdílový průběh napětí mezi kontakty A a B můžeme označit jako průběh zotaveného napětí, kdy periodicky opakující se napětí roste od nuly do maximální velikosti  $2U_m$  a poté opět klesá k nulové hodnotě, napěťové špičky jsou tím menší, čím kapacita ztrácí svůj náboj. Vypnutí zde může bez větších problémů přijít velmi brzy - již při nárůstu zotaveného napětí. To ovšem nemusí být ve všech případech

žádoucí, neboť při uhasnutí oblouku a malé vzdálenosti kontaktů či při malé elektrické pevnosti mezi kontakty může dojít ke zpožděnému průrazu kontaktní dráhy a tím k velkému přepětí. [1]



Obr. 21 Idealizovaný obvod při vypínání kapacitních proudů

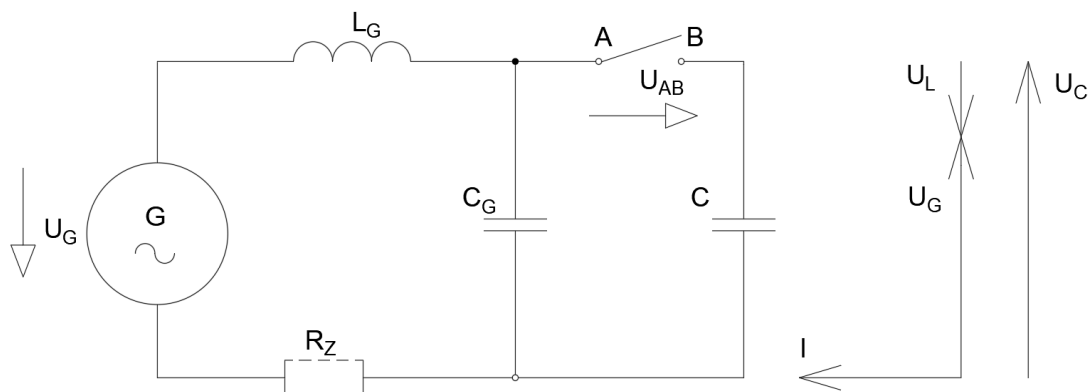
Jak již bylo zmíněno obvod na obrázku 21 je idealizovaný a tudíž jsou zde zanedbány složky odporu a indukčnosti. Zanedbání způsobí poměrně příznivější vlivy vypínání. [1]



Obr. 22 Idealizovaný průběh při vypnutí kapacitních proudů

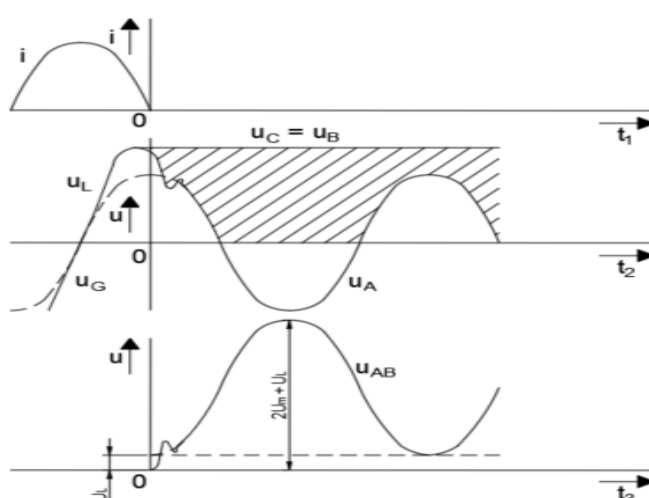
Jedinou složkou, která nemůže být zanedbána, je složka odporu, která nám počáteční průběh téměř neovlivní. Složka indukčnosti je sice podstatně menší než složka kapacity,

ovšem i přesto má velký význam. Proto je nutné si rozebrat vypínání kapacitního obvodu s indukčností (obrázek 23). [1]



Obr. 23 Obvod při vypínání kapacitních proudů s uvažovanou indukčností

Fázorový diagram (obrázek 23) dokazuje, že proud vytváří úbytky napětí na kapacitě i indukčnosti, ovšem jsou v protifázi, tudíž indukčnost v obvodu způsobuje zvětšení napětí na kapacitě  $U_C$  vzhledem k napětí generátoru  $U_G$ . Opět jako v předchozím případě je zřejmé, že pokud dojde k rozpojení kontaktů A a B, vzniká na kontaktu B napětí maximální napětí kapacity a na kontaktu A je kosinusové napětí generátoru  $u_G$ . Je zde ten rozdíl, že napětí na kontaktu A bylo v předchozím stavu vyšší, než bylo napětí uvažované a dojde tak k přechodnému kmitavému ději. Průběh zotaveného napětí mezi kontakty je opět dán rozdílem napětí mezi kontakty (obrázek 24 při čase  $t_2$ ). Obrázek 24 při čase  $t_3$  pak znázorňuje samostatný průběh zotaveného napětí, kde jeho maximální amplituda dosahuje hodnoty  $2U_m + U_L$ . [1]

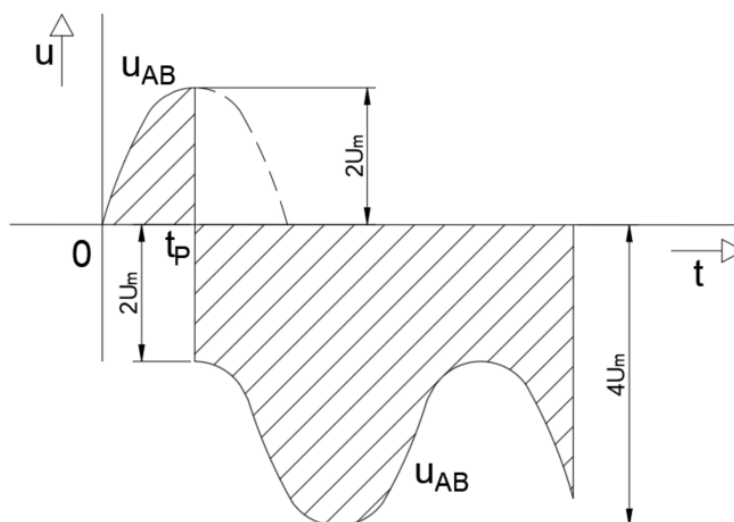


Obr. 24 Průběhy vypínání kapacitního obvodu s indukčností

Při trvalé době pevnosti přeskovkové dráhy (tj. rekombinační vliv elektrického pole je větší než jev ionizační) dojde k vypnutí při průchodu nulou. Dojde-li k porušení této

podmínky a ionizační jevy převládají, dochází k průrazu a následujícím nežádoucím jevům, kdy v čase  $t_p$  dojde k průrazu a vodivému spojení kontaktů A a B, na kterých je různé napětí. Ihned dochází k vyrovnání napětí kapacity  $U_C$  na napětí generátoru  $U_G$ . Vzhledem k velkým rozdílům napětí se začne napětí vyrovnávat přechodovým dějem a způsobuje to, že přes napětí generátoru se přeloží kmity přechodového kmitavého děje a začne obvodem procházet proud kapacitoru  $I_C$ , který se vybíjí a je fázově posunut. Pokud se nepřeruší kapacitní proud  $I_C$  v nule přechodových kmitů, tak se proud opět ustálí na původním sinusovém průběhu proudu a napětí na průběhu  $u_G$ . Při průchodu proudu další nulou se tento jev celý opakuje. [1]

Takto popsaný průraz je jen jeden z několika možných průrazů, který může nastat. Nyní je uvažováno, že k průrazu došlo v maximu zotaveného napětí. Zde v čase první nuly kapacity dosahuje přechodový děj maximální velikost a to je hodnota  $3U_m$  vzhledem k zemi. Uhasnutím oblouku a přerušení kontaktů A a B se odpojí nabitá kapacita s velikostí  $3U_m$  od obvodu. Napětí na kontaktu A opět sleduje napětí generátoru  $u_G$ . Zotavené napětí je opět dáno rozdílem potenciálů napětí na kontaktech i přes krátkodobé přerušení vlivem průrazu, které jsou vyobrazeny na obrázku 25. V čase  $t = 0$  zotavené napětí stoupá z nulové hodnoty na velikost dvojnásobného napětí maxima amplitudy, přičemž v čase  $t_p$  dochází k průrazu a přechodový děj vlivem vlastního kmitočtu obvodu otočí polaritu napětí. Toto napětí teď již  $2U_m$  narůstá podle kosinusového průběhu až do čtyřnásobné maximální velikosti amplitudy  $4U_m$  a následně klesá na původní hodnotu  $2U_m$ . Tato situace by trvala do té doby, než by došlo k úplnému vybití náboje kondenzátoru vlivem svodového proudu. [1]



Obr. 25 Vypínání kapacitního obvodu při průrazu kontaktní dráhy s výsledným zotaveným napětím



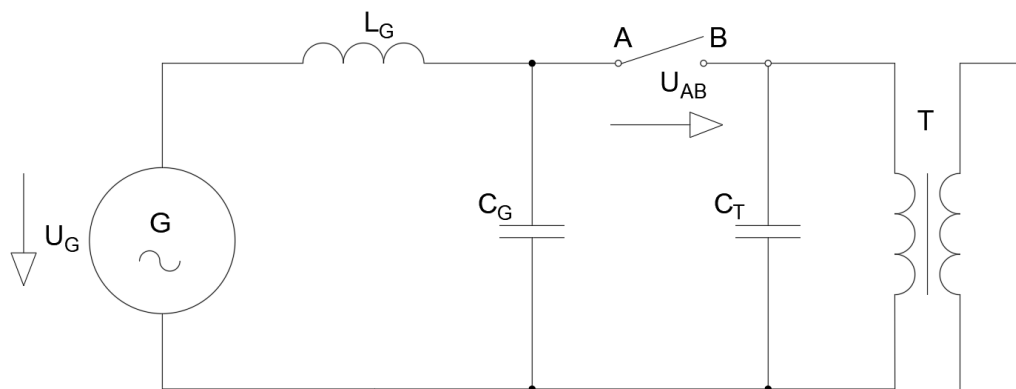
Můžeme říct, že se jedná o pozvolný nárůst zotaveného napětí, ovšem jedná se zde spíše o velmi vysoké velikosti napětí, při jednom průrazu. Mohou nastat vícenásobné průrazy kontaktní dráhy při stejných podmínkách, jako byly uvedeny. Takové průrazy se nazývají **harmonické průrazy**, tyto harmonické průrazy nejsou časté, ale pokud nastanou, dochází v nich k velmi vysokému přepětí, které ohrožuje izolaci celé sítě. Při vícenásobných průrazech dochází ke stejným dějům jako u jednoho průrazu s tím rozdílem, že vícenásobný průraz ovlivní maximální velikost amplitudy, a to tím, že s násobky průrazů se násobí i maximální velikost amplitudy. [1]

Uvedené způsoby vypínání kapacitní zátěže byly všechny směřovány do jednoho místa, to se děje například u kondenzátorových baterií. U vypínání dlouhého nezátíženého vedení (vedení naprázdno) není kapacita soustředěna v jenom místě, ale je rozprostřena po celém vedení. [1]

K přepětí při vypínání kapacitních obvodů může dojít jen tehdy, dojde-li k průrazu kontaktní dráhy. Vyhneme-li se průrazům, nebude při vypínání kapacitních obvodů docházet k přepětí. Vhodným typem zhášecího média jsou zde vypínače tlakovzdušné, s fluoridem sírovým a nejpříznivější vliv zde má vypínač vakuový. U vypínačů se studenou charakteristikou tak strmou, že průrazné napětí kontaktní dráhy vždy převýší velikost zotaveného napětí, se jedná o tzv. bezprůrazové vypínače a jejich schopnosti říkáme bezprůrazné kritérium. [1]

#### 5.4 Vypínání malých indukčních proudů

Strmost průběhu zotaveného napětí je dána účinníkem obvodu. Při velkém účinníku je i strmost velká a naopak malý účinník představuje malou strmost zotaveného napětí. Při vypínání některých stavů, jako je vypínání vysokonapěťových transformátorů naprázdno nebo tlumivek, vypínání motorů naprázdno a proudů kompenzačních tlumivek u hladin VVN a ZVN, tedy při vypínání malých indukčních proudů (jednotky nebo desítky ampér), vznikají netradiční jevy. Vypneme-li takovéto malé indukční proudy účinným zhášedlem, zanikne proud před hodnotou přirozené nuly a vznikají tím přepětí, jejichž velikost je mnohonásobně větší než jmenovité napětí. Tyto netradiční jevy jsou rozebrány na případu vypnutí vysokonapěťového nezátíženého transformátoru (transformátoru naprázdno), jehož schématický obvod je znázorněn na obrázku 26. [1]



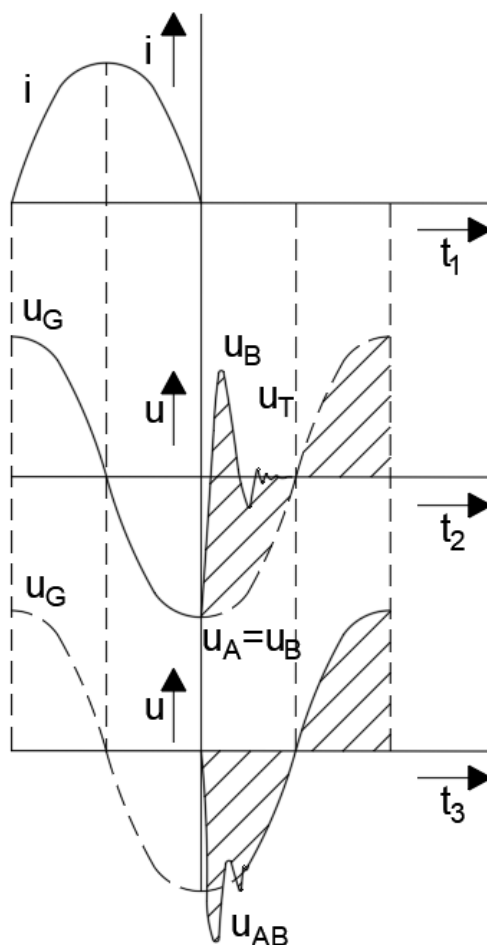
Obr. 26 Obvod při vypínání malých induktivních proudů u transformátoru naprázdno

Indukčnost  $L_G$  a kapacita  $C_G$  generátoru jsou poměrně malé s porovnáním kapacity  $C_T$  a indukčnosti transformátoru. Jelikož parametry  $L$  a  $C$  mají vliv na vlastní kmitočet, tak obvod generátoru do kontaktu A má mnohem větší kmitočet než obvod od kontaktu B do transformátoru. Nejprve budeme uvažovat, že oblouk, který je mezi kontakty A a B zanikne v proudové nule, jako je zajištěno na prvním průběhu v obrázku 27. Než oblouk zanikl, úbytek napětí na indukčnosti generátoru  $L_G$  byl skoro zanedbatelný, a proto se napětí na transformátoru  $U_T$  a napětí na generátoru  $U_G$  rovnalo. Po rozpojení kontaktů a uhasnutí oblouku se tyto napětí již nerovnají, jsou tedy rozdílné. [1]

Napětí na kontaktu A sleduje napětí generátoru  $U_G$ , které přebíhá proud, vzhledem k indukčnímu charakteru. Vlivem úbytku napětí na indukčnosti generátoru  $L_G$  je napětí generátoru trochu vyšší, než bylo napětí na spínači před uhasnutím oblouku. Vlivem rozdílných velikostí napětí dojde ke kmitavému přechodovému ději, ovšem amplituda kmitů je tak malá, že se může zanedbat, a tudíž můžeme říct, že napětí na kontaktu A se rovná napětí na generátoru  $U_G$ , které je znázorněno na druhém průběhu v obrázku 27. [1]

Po uhasnutí oblouku (obrázek 27) je proud nulový, a proto je i energie na indukčnosti transformátoru  $L_T$  nulová. Kapacita  $C_T$  je ovšem plně nabitá na maximální napětí generátoru  $U_G$  a vzhledem k rozpojení obvodu se začne vybíjet přes indukčnost  $L_T$ , a to způsobí rozkmitání odpojeného obvodu. Tímto rozkmitáním je dáno napětí na kontaktu B. [1]

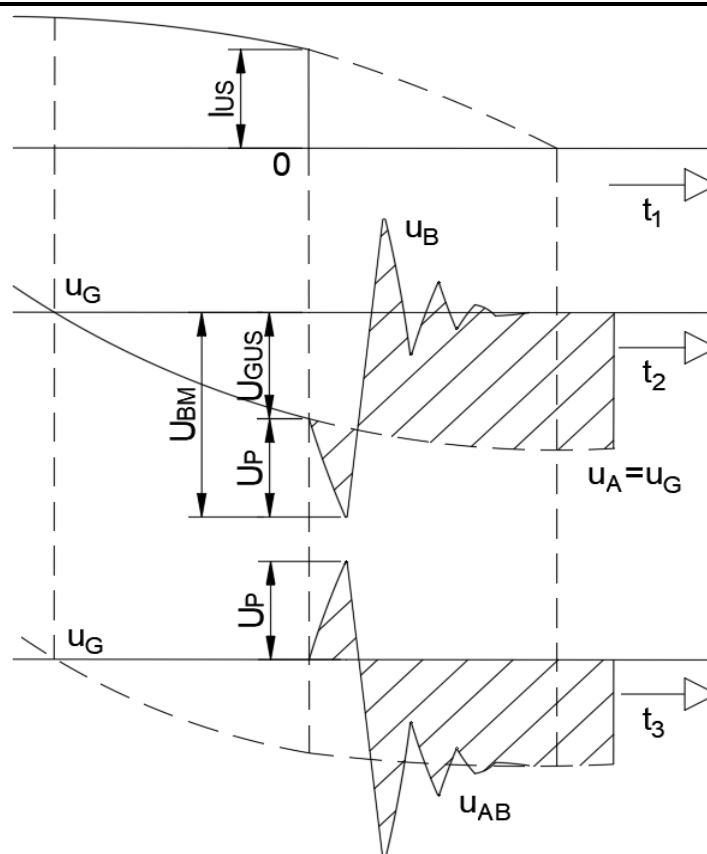
Jak již bylo několikrát řečeno, zotavené napětí je dáno rozdílem napětí na kontaktech A a B (obrázek 27 při čase  $t_3$ ). [1]



Obr. 27 Průběhy napětí a proudu na kontaktech a zániku proudu v nulové hodnotě při vypínání transformátoru naprázdno

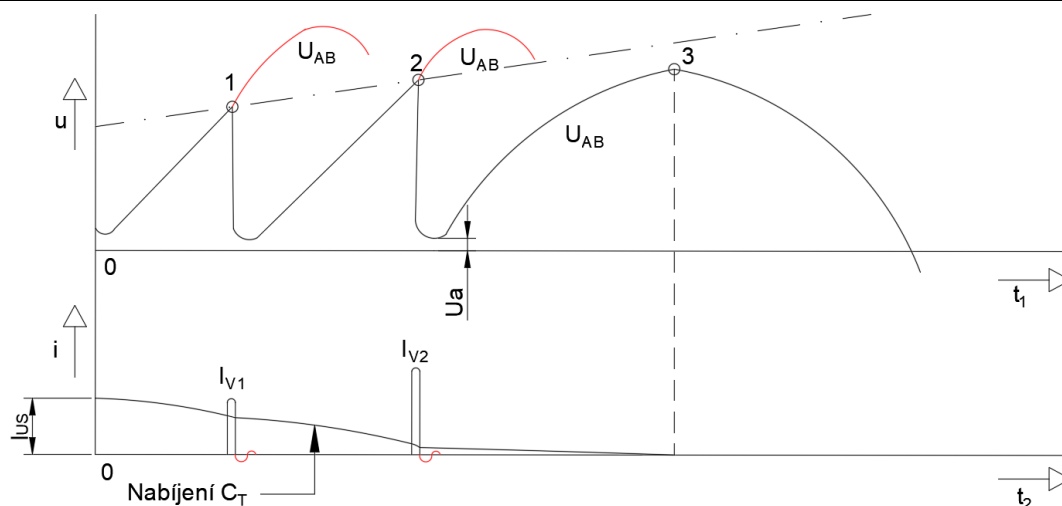
Na obrázku 28 je pro bližší porozumění vzniku přepětí rozebrán fiktivní případ, při kterém dojde k přerušení proudu mimo jeho nulovou hodnotu. Velikost proudu v čase  $t=0$ , kdy došlo k přerušení, je označena jako  $I_{US}$ . Vzhledem k nacházejícímu se proudu zde není energie nulová, ale můžeme ji spočítat jako:  $We = \frac{1}{2} L_T \cdot I_{US}^2$

Největší energie bychom dosáhli useknutím proudu v jeho maximální hodnotě amplitudy. Vzhledem k tomu, že kapacita  $C_T$  byla při useknutí nabita na napětí zdroje  $U_{GUS}$ , naroste napětí na kontaktu B až na hodnotu  $U_{BM}$ , kdy  $U_{BM} = U_{GUS} + U_P$ . Zotavené napětí je znázorněno ve třetím průběhu obrázku 28. [1]



Obr. 28 Průběhy napětí a proudu na kontaktech a zániku proudu před nulovou hodnotou (fiktivní případ)

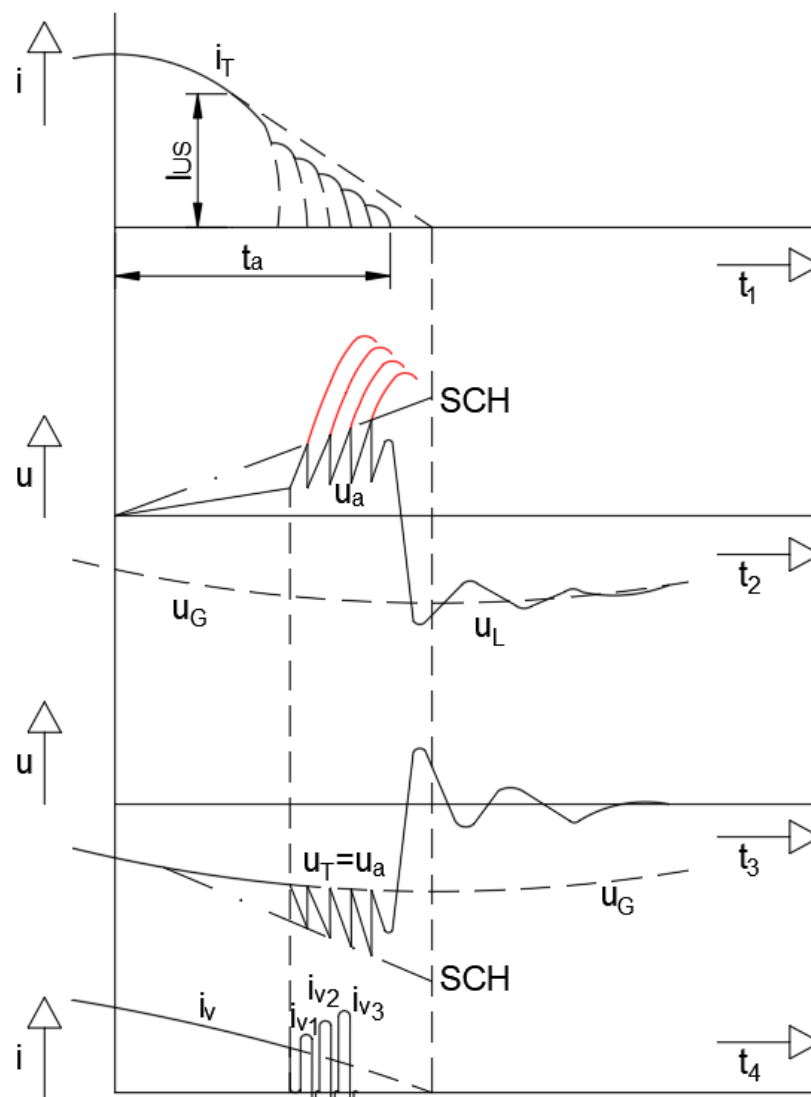
Vrátíme-li se zpět k obvodu 26, kde dochází při vypínání vypínače s účinným zhášením k velmi intenzivnímu chlazení oblouku proudu, odpor narůstá velmi rychle a strmě tak, že ho můžeme zanedbat. Lze tedy o proudu uvažovat, že je stejnosměrný, tím dochází v charakteristice oblouku k přibližování stabilního a labilního bodu hoření oblouku, dokud snižováním proudu nedojde k jejich úplnému splynutí. Splynutím těchto dvou bodů dochází ke změně obvodu ze stavu stabilního do stavu nestabilního, tím se do oblouku nedostává dostatečné množství energie a nedosahuje se potřebné ionizace, což vede k zániku proudu a zániku oblouku. Po zániku oblouku se oddělí generátor od transformátoru a probíhá děj, který je znázorněn na obrázku 28. Ovšem napětí mezi kontakty nevzroste až na hodnotu  $U_P$ , protože průrazné napětí mezi kontakty není větší než zotavené napětí a ani nemá tendenci růst. Mezi kontakty je pouze malé množství nabitých částic a elektrická pevnost je zanedbatelně jiná než elektrická pevnost přeskokové dráhy. Protože rychlost pohyblivého kontaktu je oproti rychlosti elektrických dějů velmi malá, roste průrazné napětí v závislosti na čase velmi pomalu. Za těchto podmínek se časový průběh průrazného napětí označuje jako *studená charakteristika přeskokové dráhy*, která je zakreslena červeně na obrázcích 29 a 30. [1]



Obr. 29 Průběhy napětí a proudu oblouku s opakovanými průrazy kontaktní dráhy při vypínání malého induktivního proudu

Při nárůstu zotaveného napětí až do takové velikosti, že přesahuje hodnotu průrazného napětí mezi kontakty, dojde k průrazu vlivem velké intenzity elektrického pole, tento děj je znázorněn na obrázku 29 v průsečíku bodu 1 a napětí  $u_{AB1}$  se studenou charakteristikou SCH. Při vzniku průrazu se opět spojí kontakty A a B a dojde ke snížení napětí oblouku. Vybíjí se kapacita transformátoru  $C_T$  přes obvod generátoru a vypínačem prochází proud  $I_{V1}$ , ovšem dochází stále ke zhašení, a proto proud poklesne k nule a jev se opakuje. Při opakovaném ději část energie přešla z obvodu transformátoru do obvodu generátoru, kde se přeměnila na rezistorech na teplo, tudíž při druhém průrazu je energie v indukčnosti transformátoru  $L_T$  malá a i vrchol napětí  $u_{AB2}$  je nižší, a tím se sníží i strmost nárůstu napětí. V bodě 3 po druhém průrazu nedosáhne napětí  $u_{AB3}$  do křivky studené charakteristiky, a tak můžeme říci, že bod 3 je místo konečného vypnutí obvodu. [1]

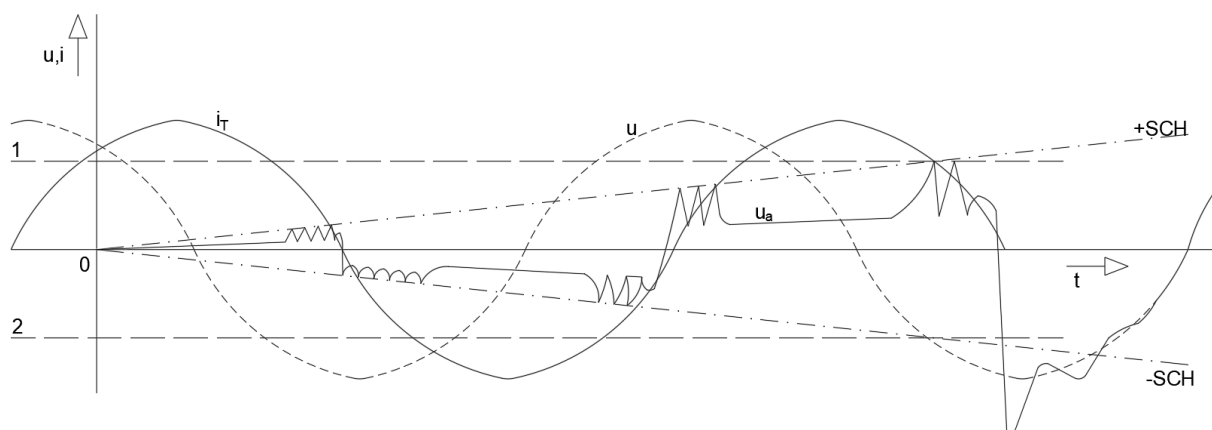
Na obrázku 30 je při čase  $t_1$  znázorněný proud transformátoru, při čase  $t_2$  napětí na kontaktech, čas  $t_3$  určuje napětí na kontaktu B a čas  $t_4$  určuje proud vypínačem. Vypínačem prochází souvislý proud jen do doby oddálení kontaktů v čase  $t = 0$ , poté dojde k useknutí proudu. Následně vypínačem procházejí pouze krátkodobé proudové nárazy výbojového proudu  $i_v$ , který je z kapacity  $C_T$ . Proud indukčnosti transformátoru  $i_T$  postupně klesá. [1]



Obr. 30 Průběhy napětí a proudu při vypínání transformátoru naprázdno s opakovatelnými průrazy

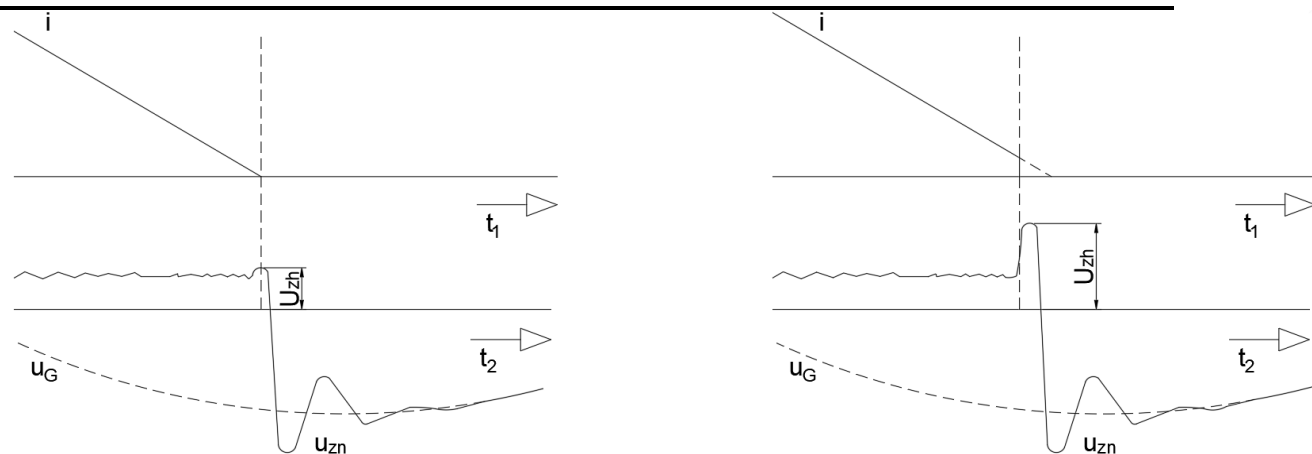
Vypínání obvodu s useknutým proudem před jeho nulovou hodnotou můžeme označit jako stejnosměrný způsob zhášení oblouku. Takto lze vypínač aplikovat pouze při vypínání malých proudů. Při vyšších hodnotách proudů jako jsou jednotky ampér, je již oblouk v celém svém rozsahu půlvlny nestabilní. U hodnot desítek ampér může nastat, že zhášecí účinek nemusí být dostatečný pro narušení oblouku v široké oblasti kolem amplitudy, ale jen v malém okolí jeho nulové hodnoty. Při velké hodnotě indukčnosti transformátoru  $L_T$  se může proud useknout a následné pilové kmity nastanou ještě před proudovou nulou. Při malé hodnotě studené charakteristiky se energie odčerpává průrazy jen velmi pomalu. V hodnotě přirozené nuly ještě není energie vyčerpána a nedochází k definitivnímu přerušení obvodu, protože na straně transformátoru se vyvolají další průrazy. Proud se zvyšuje. Když dosáhne hodnoty, kterou již zhášení neovlivňuje, stane se

oblouk stabilním a proud kopíruje sinusovku. Při blízkosti další nulové hodnoty s časem narostla i pevnost průrazné dráhy. To má za následek rychlejší odčerpávání energie indukčnosti do té doby, než se úplně vyčerpá náboj (obrázek 31). Na obrázku došlo k rozpojení kontaktů v čase  $t = 0$ , body 1 a 2 znázorňují rovnoběžky, které vyznačují velikost proudu, který je vypínač schopen useknout, čerchovaně je naznačený úsek obou polarit studené charakteristiky. [1]



Obr. 31 Průběhy napětí a proudu při vypínání proudů v řádech desítek ampér s opakovatelnými průrazy kontaktní dráhy

Pokud bychom chtěli řešit vypínání velikostí proudů dosahující několika set ampérů, je zde ta výhoda, že v celém průběhu půlvlny je oblouk stabilní, jen v těsné blízkosti proudové nuly může dojít k useknutí. Pokud nastane tento stav, poznáme ho podle vysoké zhášecí špičky přechodu obloukového napětí do zotaveného napětí. Obrázek 32 znázorňuje průběh napětí a proudu při uhasnutí oblouku v proudové nule a průběh napětí a proudu při uhasnutí oblouku před proudovou nulou. V případě vypnutí v proudové nule přechází téměř plynulou křivkou obloukové napětí do zotaveného napětí, v případě vypnutí před proudovou nulou je patrné, že tento přechod probíhá se špičkou, která je několikanásobně větší než předešlá velikost obloukového napětí. [1]



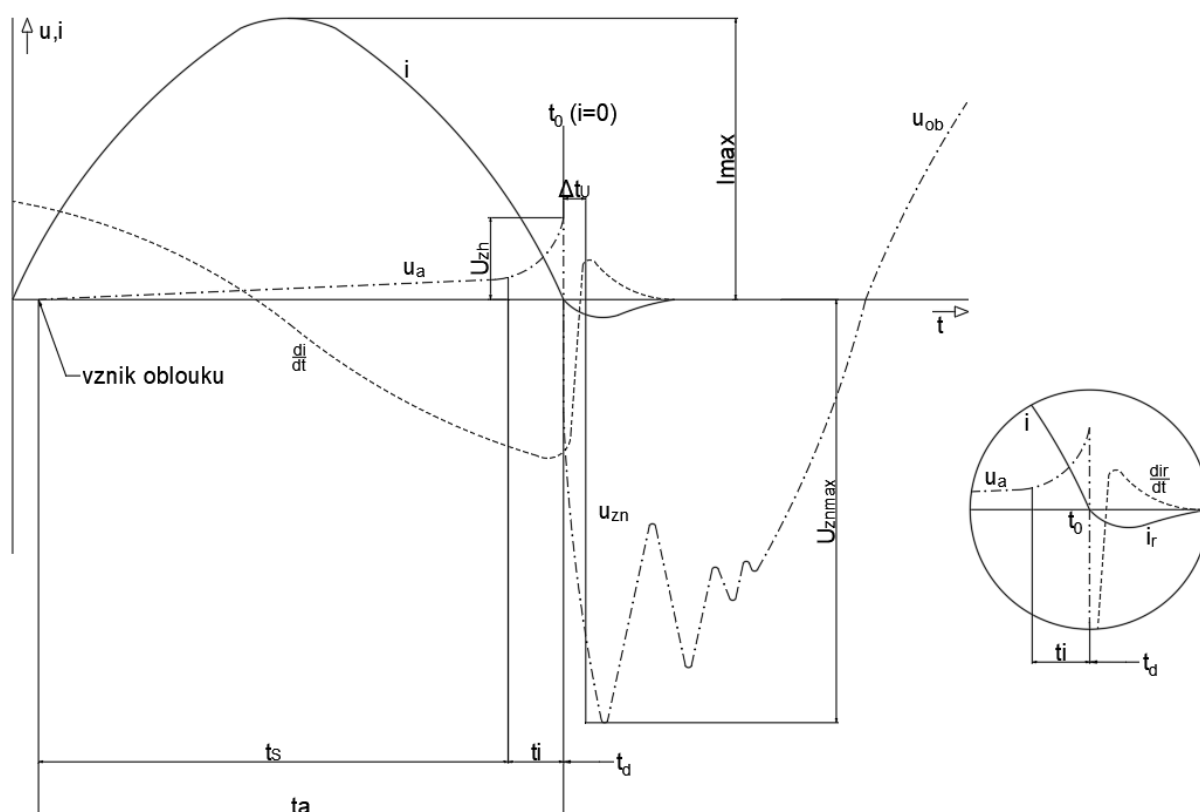
Obr. 32 Průběhy napětí a proudů při vypínání velkých indukčních proudů při uhasnutí oblouku  
v proudové nule před proudovou nulou

Pokud bychom chtěli vypínat proudy v řádech stovek a tisíců ampér, je zřejmé, že zde nedochází k usekávání proudů ani v okolí proudové nuly. Je zde velký stupeň ionizace dráhy a v místě paty oblouku dochází k vypařování kontaktů. Do doby přirozené nuly proudu je elektrická pevnost mezi kontakty malá, ovšem po uhasnutí oblouku prudce roste, jedná se o takzvanou *horkou charakteristiku přeskokové dráhy*. Horká charakteristika přeskokové dráhy má průrazné napětí během hoření oblouku dané obloukovým napětím. Pokud proud projde nulou, naroste pevnost přeskokové dráhy oddálených kontaktů na hodnotu studené charakteristiky. [1]



## 6. Intervaly vypínaného oblouku:

Při vypínání vypínače dochází při rozpojení a oddalování kontaktů ke spínacím dějům. Tyto děje vznikají při rozpojení kontaktů a zanikají při úplném uhašení oblouku. Definujeme tři základní intervaly vypínacího děje: Silnoproudý interval, Interakční interval a Dielektrický interval. Rozdělením vypínacích dějů do těchto intervalů se dají zjistit základní požadavky na zhášecí komoru při vypínání. Intervaly mohou být určeny jen přibližně vzhledem k závislosti na kmitočtu proudu a časové konstantě oblouku. Časová konstanta závisí nejen na velikosti proudu, ale také na zhášecí komoře. [2]



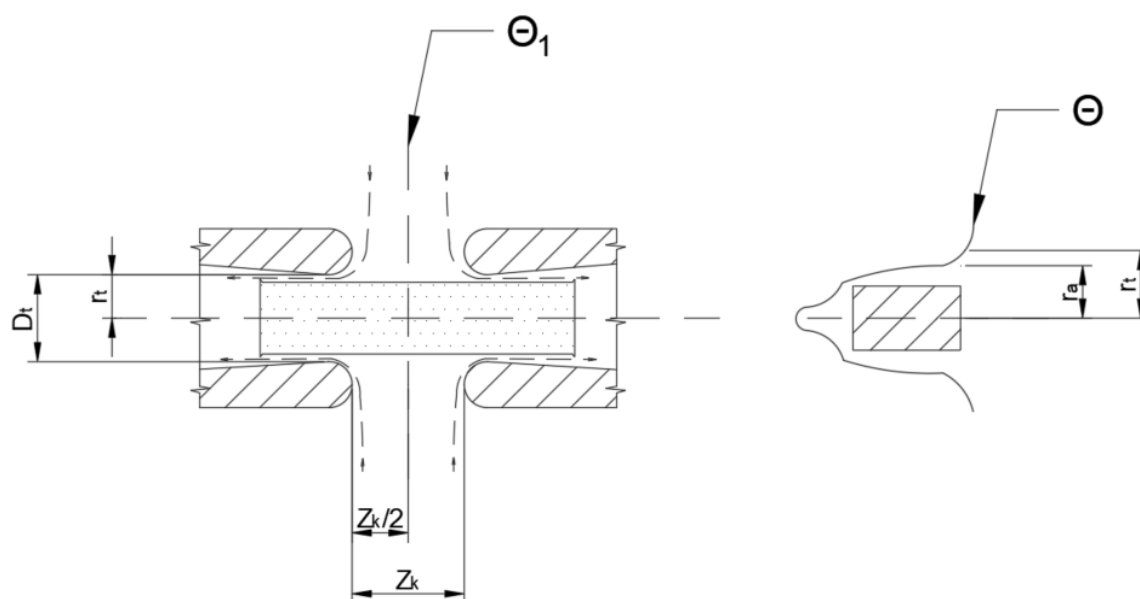
Obr. 33 Základní intervaly vypínacího procesu

$t_s$  – silnoproudý interval,  $t_i$  – interakční interval,  $t_d$  - dielektrický interval,  $t_a$  - doba hoření oblouku,  $i$  - proud,  $di/dt$  derivace proudu podle času,  $i_r$  - zbytkový proud,  $di_r/dt$  derivace zbytkového proudu podle času,  $u_a$  - napětí oblouku,  $U_{zh}$  - zhášecí amplituda napětí,  $u_{zn}$  - zotavené napětí,  $U_{zn\ max}$  - 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  $U_{zn\ max}$  okamžitá strmost zotaveného napětí v nulové hodnotě proudu. [Převzato z [2]]

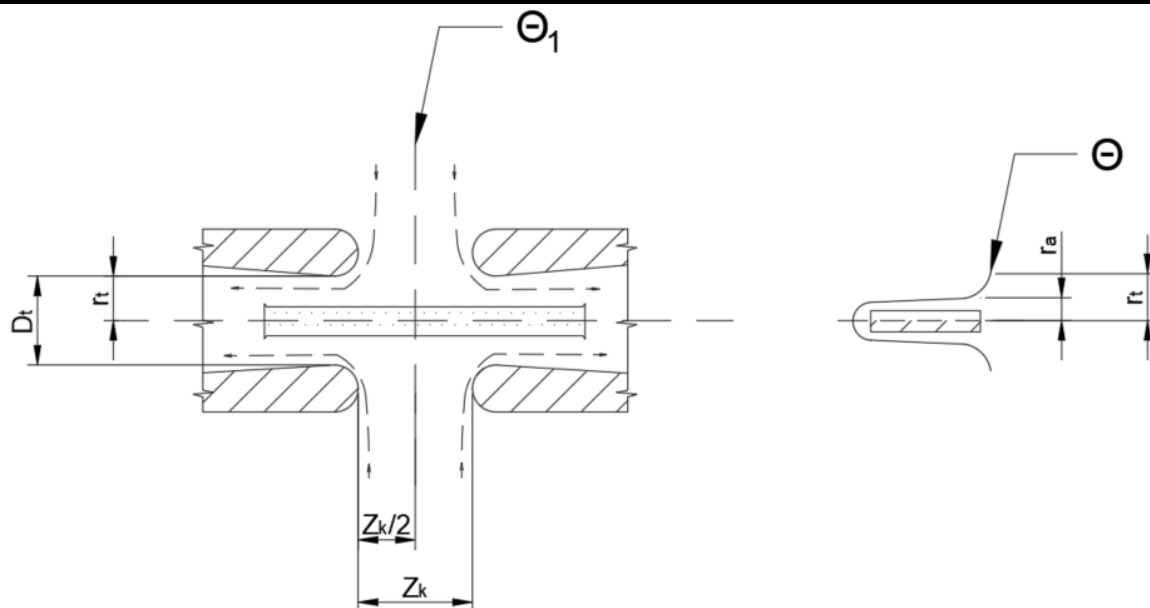
## 6.1 Silnoproudý interval

Silnoproudý interval (obrázek 33) je znázorněn jako časové rozmezí  $t_s$ . Tato časová oblast je místem hoření oblouku, a proto zahrnuje během vypínání velké zkratové proudy. Vzhledem k malé změně sinusového proudu u maxima můžeme říct, že se jedná o oblouk stacionární. Proud v silnoproudém intervalu je dán pouze vlastními parametry obvodu. Obloukové napětí je velmi malé oproti napětí zdroje a činný odpor oblouku je zanedbatelný oproti impedanci zkratového oblouku, proto se zde neuvažuje vzájemné působení obloukového napětí a proudu v obvodu. Pokud ovšem vypínáme malé indukční a kapacitní proudy, vzhledem k velkému obloukovému napětí, které deformuje křivku proudu. [2,6]

V silnoproudém intervalu má oblouk velké proudy a tedy i velký průměr oblouku (34). V oblasti maximálního proudu  $I_{\max}$  se oblouk považuje za stacionární a musí se určit jeho vypínací parametry, aby nešlo k tzv. zahlcení trysky, které by mělo vliv na vypínací schopnost vypínače tzv. termické selhání. [2,6]



Obr. 34 Průchod velkými zkratovými proudy



Obr. 35 Průchod malých zkratových proudů v okolí nulové hodnoty proudu

Obrázek 34 a 35. Schématické znázornění oblouku v ideálním válcovém tvaru ve zhášedle při dvoustranném proudění, kde:

$D_t$  – průměr zhášecí trysky,  $r_t$  – poloměr zhášecí trysky,  $r_a$  – poloměr oblouku,  $z_k$  – zdvih kontaktu,  $\Theta$  – teplota okolního plynu,  $\Theta_1$  - teplota

### 6.1.1 Zahlcení trysky:

Může nastat při vypínání takový stav, při kterém oblouk s vysokou teplotou vyplní celý průřez hrdla zhášecí trysky. Tento jev představuje obrázek 34, kdy poloměr oblouku  $r_a$  by se rovnal nebo byl větší než poloměr zhášecí trysky  $r_t$ . Pak by okolní ohříváný plyn expandoval i v zhášecí komoře, tudíž by nedocházelo k termodynamickému proudění studeného plynu ze zhášecí komory přes zhášecí trysku do výfuku. Zahlcení trysky je tudíž nežádoucí jev, který naruší proudění a chlazení oblouku. Proto se udávají vypínací kritéria především pro zahlcení proudu. [2,6]

## 6.2 Interakční interval

Interakční interval (obr. 33, označen jako  $t_i$ ) je interval, při kterém dochází k hoření oblouku a interakci (vzájemné působení) obloukem v zhášecí komoře a vypínaným obloukem. Tato oblast je důležitá vzhledem k funkčnosti vypínače a rozhodne se, zda vypínač vypne nebo dojde k selhání vypínače. Všechna problematika spínání se odehrává v tomto intervalu vzhledem k výslednému vypnutí či selhání. [2,6]

Vzniklý oblouk je zde chlazen a napětí oblouku velmi rychle narůstá. Tento interval  $t_i$  můžeme rozdělit na dva intervaly  $t_{i1}$  a  $t_{i2}$ . Přičemž interval  $t_{i1}$  je považován za časovou

oblast tzv. *Výrazné změny obloukového napětí*, před průchodem proudu nulové hodnoty. Interval  $t_{i2}$  je tzv. *Interval zbytkového proudu*, kde dochází k malému průchodu proudu, kterému se snažíme jak velikostně tak i dobou trvání omezit. [2,6]

V interakčním intervalu je nutné dbát na teplenou setrvačnost oblouku, která se projeví následkem rychlé časové změny proudu v průchodu nulovou hodnotou, a proto je potřeba zde zkoumat dynamický oblouk. V tomto případě zde bereme, že průměr oblouku je menší než je průměr trysky a nemůže zde dojít k zahlcení trysky. Teplota, obloukové napětí ani vodivost neodpovídají okamžité hodnotě proudu jako ve stacionárním stavu, ale jsou časově zpožděny. [Převzato z [2]]. [2,6]

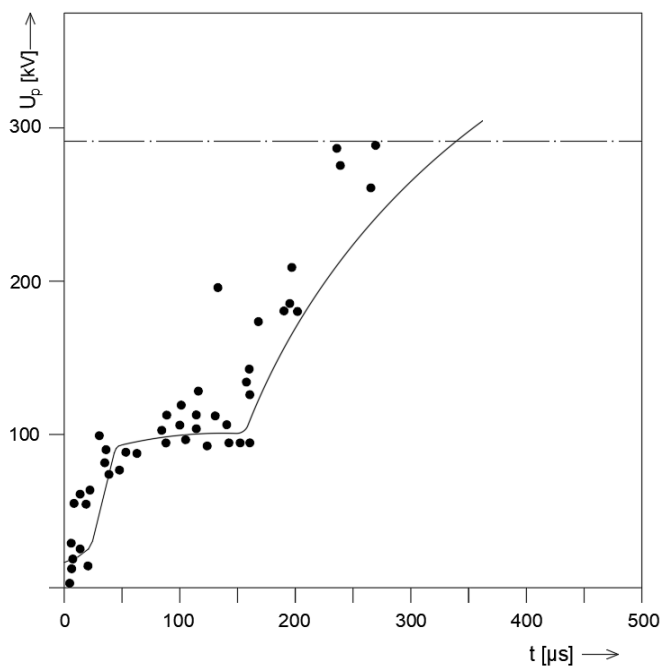
### 6.3 Dielektrický interval

Dielektrický interval je interval, který je znázorněn na obrázku 33 a začíná ihned po přerušení proudu v obvodu. Je-li proud přerušen, je jeho hodnota nulová a hodnota  $di/dt$  je maximální, ale vzhledem k zbytkovému proudu se změni znaménko  $di/dt$  a po následném vypnutí se výsledná hodnota  $di/dt$  mění z maximální na nulovou. V případě selhání by nastal přeskok a následné opětovné zapálení oblouku, a poté nastane skok v průběhu  $di/dt$  z nulové hodnoty na maximální hodnotu. Časový průběh zotaveného napětí je dán pouze elektrickým obvodem, který namáhá vypínací dráhu mezi kontakty. Za úspěšné vypnutí můžeme považovat stav, kdy v každém okamžiku je průrazné napětí vypínací dráhy vyšší než napětí zotavené. Pokud dojde k opětovnému zapálení oblouku a následnému selhání, jedná se o tzv. *dielektrický průraz*. Tento dielektrický průraz nastává v případě, že jsou zde nedokonalé termodynamické poměry mezi kontakty. Termodynamické poměry jsou ovlivněny z předchozích stavů hoření oblouku, který se nachází v silnoproudém intervalu, kde dochází k velkým tepelným účinkům na kontaktech a v proudícím plynu. Při zvýšení teplot proudícího plynu způsobí jeho menší elektrickou pevnost a zvýšení teplot na kontaktech, což zlepší uvolňování elektronů z kontaktů. Z toho vyplývá, že největší pravděpodobnost dielektrického průrazu může nastat v prvních okamžicích nárůstu zotaveného napětí, kdy jsou nejvíce ovlivněny poměry ve vypínací dráze vlivem předchozího hoření oblouku. Pokud nastane dielektrický průraz v maximální hodnotě zotaveného napětí nebo za ní je tento stav zodpovědný, je to způsobeno nedostatečnou elektrickou pevností mezi kontakty, vzhledem k nevhodnému tvaru elektrického pole, krátkou vzdáleností kontaktů nebo nedokonalému proudění plynu. Obnovování dielektrické pevnosti se zabývá kapitola 7. [2]

## 7. Obnovování dielektrické pevnosti

Charakteristiky vypínacích schopností z hlediska dielektrického intervalu se dají zjistit za předpokladu, že prozkoumáme průrazné napětí v závislosti na čase a na vypínaném proudu v proudícím plynu přes zhášecí komoru. Návrh zhášecí komory se zaměřuje na vypínaný proud a strmost zotaveného napětí v dielektrický interval, proto musí být tento interval podrobněji rozebrán. [10,13]

Při rozpojení a následném oddálení kontaktů, dojde k přerušení proudu a mezi kontakty se vytvoří zbytkový sloupec oblouku a horkých plynů. Jejich vlastnosti jako jsou teplota, stupeň ionizace i poloměr společně s prouděním plynu i změnou rozměrů určuje růst průrazného napětí s časovou závislostí. Vzhledem k těmto fyzikálním změnám ve zhášecí komoře můžeme rozdělit dielektrický interval na několik fází, které vidíme na obrázku 36. [10,13]



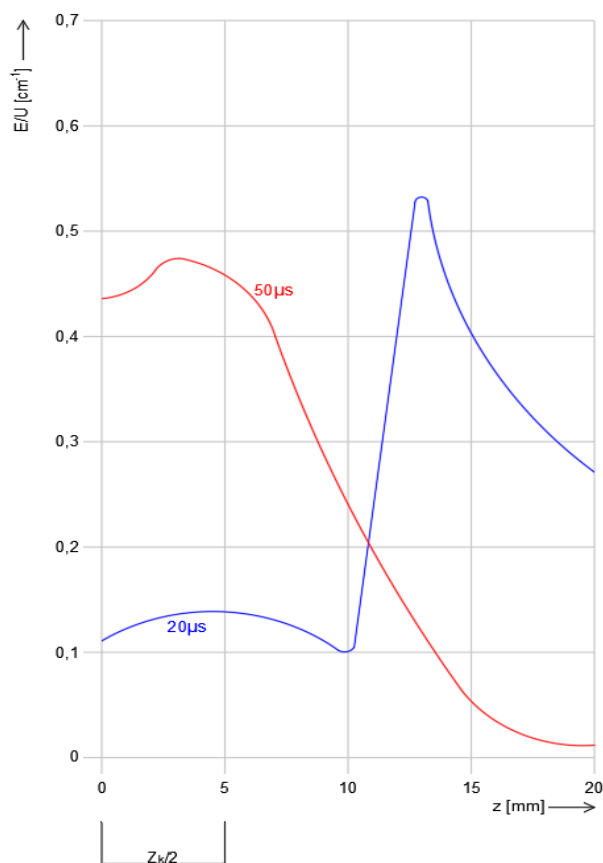
Obr. 36 Časový průběh průrazného napětí v dielektrickém intervalu

### První fáze

Nastává ihned po přerušení proudu (řádově jednotky  $\mu\text{s}$ ) a vyznačuje se vodivým obloukem s rychlou rekombinací volných elektronů. Jde o oblast, která ještě může posuzována jako interval malého zbytkového proudu. [10,13]

**Druhá fáze**

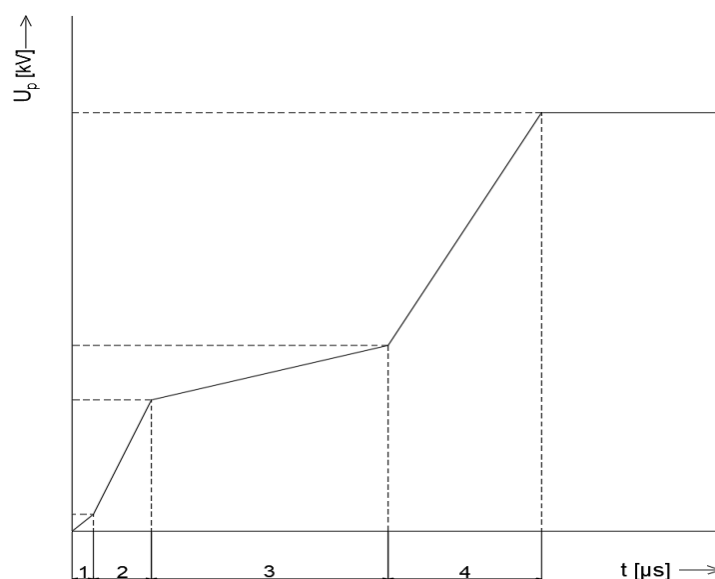
Po uplynutí několika desítek  $\mu\text{s}$  od přerušení proudu je druhá fáze vyznačována definitivním přerušením jak proudu, tak i příkonu do oblouku, velkou hustotou iontů a volným rozpadem sloupce horkých plynů. Prostorový náboj iontů ovlivňuje celkové rozprostření intenzity elektrického pole mezi kontakty, která je dána superpozicí intenzity elektrického pole ve studeném stavu a intenzity elektrického pole od prostorových nábojů. Prostorovým nábojům se v závislosti na čase mění hustota a tím se mění i výsledná intenzita elektrického pole, která je závislá na době od přerušení proudu. Na obrázku 37 je znázorněno, že po dobu  $30 \mu\text{s}$  je stále mezi kontakty velká hustota i pohyblivost iontů. Důsledkem toho se sníží intenzita elektrického pole mezi kontakty. Ovšem za hrdlem trysky je teplota nižší, odpor vyšší a vyšší je i intenzita elektrického pole, díky čemuž je sníženo napět'ové namáhání dielektrika mezi kontakty. Snížením napět'ového namáhání dielektrika mezi kontakty vede k zlepšení napět'ového namáhání v prvním vrcholu pilového průběhu zotaveného napětí při vypínání blízkého zkratu. [10,13]



Obr. 37 Průběhy intenzity elektrického pole ve zhášecí trysce v různých dobách po vypnutí proudu

**Třetí fáze**

V době 50  $\mu\text{s}$  od přerušení proudu je třetí fáze vyznačena nižším nárůstem průrazného napětí, jak je zřejmé z obrázku 38. Průběh intenzity se velmi přibližuje studenému stavu. V třetí fázi je zbytkový náboj v místě s malou rychlostí proudění narušován. Pomalá rekombinace iontů je zapříčiněna nízkou teplotou plynu. Dielektrická pevnost plynu SF<sub>6</sub> je při snížení teploty od hodnoty 2300 K do hodnoty 1100 K přímo úměrná hustotě plynu. V případě stanovení průrazného napětí uvažujeme o prostředí jako o nehomogenním. Na napěťovou pevnost při velkých strmých nárůstu zotaveného napětí nemají prostorové náboje žádný vliv. V případě pomalejšího nárůstu napětí asi po době 100  $\mu\text{s}$  se nevytvoří prostorový náboj a průrazné napětí roste pomaleji. [10,13]



Obr. 38 Idealizovaný časový průběh průrazného napětí s vyznačenými fázemi v dielektrickém intervalu

**Čtvrtá fáze**

V časovém období mezi 150 až 200  $\mu\text{s}$  od přerušení proudu je vyznačena čtvrtá fáze rychlým nárůstem průrazného napětí, které končí až je průrazné napětí ve studeném proudícím plynu. V této době již prostor mezi kontakty nemá žádné ionizované částice ani horké plyny. Ionizaci v nehomogenním elektrickém a tlakovém poli proudícího plynu je určena napěťová pevnost ve studeném proudícím plynu. Nejvíce namáhaným místem je místo s největší hodnotou  $E/p$ , toto místo bývá většinou ve zhašecí trysce na povrchu kontaktů. Ve čtvrté fázi je největší rozptyl průrazného napětí a to vzhledem k různým časovým dobám nárůstu zotaveného napětí do maximální hodnoty. [10,13]

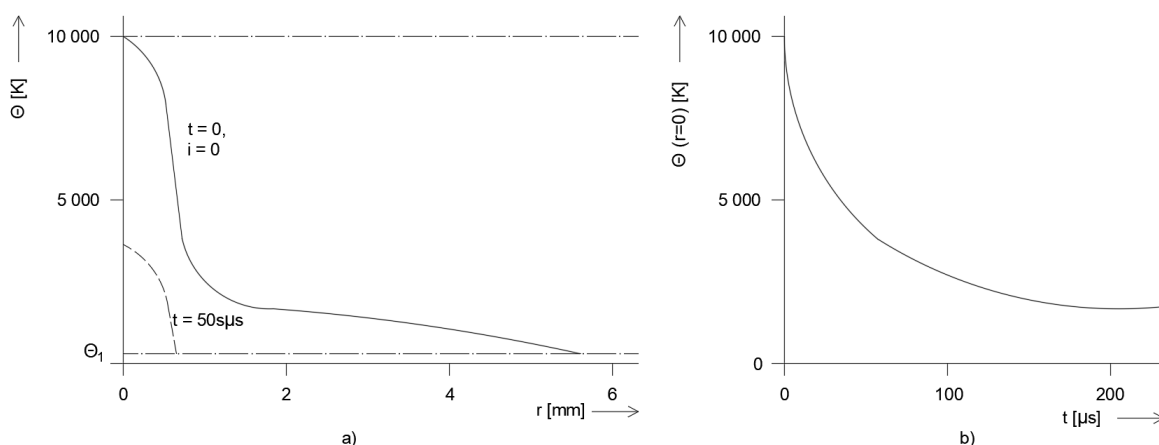
**Pátá fáze**

Se nachází v čase po 1 ms. Vyznačuje se poměry ve studeném plynu, kde vypínací dráha je namáhána obnoveným napětím a také napětím při vypínání kapacitních proudů. V této fázi je již vypínač vypnut a nedochází k žádným změnám. Vypínač je navržen, aby vydržel opakující se cykly zapínání a vypínání a s ním související namáhání. [10,13]

**7.1 Závislost průrazného napětí na vypínaném proudu**

Po přerušení proudu narůstá zotavené napětí a svého vrcholu dosáhne ve třetí fázi dielektrického intervalu, tj., kdy průrazné napětí je ovlivňováno zbytkovým sloupcem horkých plynů s ionizovanými částicemi. Je zřejmé, že průrazné napětí je nižší než ve studeném stavu a s vyšším vypínaným proudem je rozdíl napětí větší. Čím je větší vypínaný proud tím je větší hystereze vzhledem k její úměrnosti a uděluje počáteční podmínky nárazové ionizaci. Průběh teploty v závislosti na poloměru oblouku a v čase po přerušení znázorňuje obrázek 39. Z průběhů je patrné, že při vyšším vypínaném proudu se více uplatní tepelná hystereze a tím se rozměry oblouku i teplota budou zmenšovat pomaleji. Vysoká strmost vypínaného proudu způsobí zvýšení tepelnému zpoždění teploty oblouku a vede k vyšší teplotě i větším rozměrům zbytkového sloupce oblouku. Tento jev nastává i při jevu zvaném *zahlcení zhášecí trysky*. Průrazné napětí je závislé pouze na vzdálenosti kontaktů.

[13]



Obr. 39

a) závislost teploty oblouku na poloměru oblouku

b) závislost teploty v ose oblouku na době po vypnutí proudu 30 kA při tlaku 1,4 MPa

**7.2 Závislost vypínací schopnosti na vzdálenosti kontaktů**

Jednotlaký princip s izolační zhášecí tryskou má závislost vzdálenosti kontaktů na vypínací schopnosti poněkud složitější. Průběh zkratového proudu v obvodu, vypínací



proces a pohyb kontaktů začínají náhodně a tudíž nejsou závislé na funkci vypínače. Vzhledem k této nezávislosti musíme pak uvažovat časovou vzdálenost kontaktů na časové závislosti vypínaného proudu. [13]

Z obrázku 12 je patrné, že průtočný řez se zvětšuje při změně ze stavu a) do stavu b) až do vzdálenosti kontaktů  $z_{ke}$ . V místě kontaktů  $z_{ke}$  je nejvyšší možné průtočné množství dané průřezem hrdla zhášecí trysky. Vzdálenost hrdla trysky je  $h_t \geq h_{te}$ , z toho lze určit vzdálenost kontaktů  $z_{ke}$  z rovnosti průřezů: [13]

$$S_t = S_{t2} + S_{tz}(z_k) \quad (6)$$

Předpokládají-li se ideálně hladké kanály kontaktů a proudění plynů v maximálním možném průtoku, lze určit vzdálenost kontaktů: [13]

$$z_{ke} = h_t + \frac{\sqrt{2 \cdot D_t^2 + D_{t2} - D_t}}{2 \cdot \text{tg}(\gamma)} \quad (7)$$

Při této vzdálenosti kontaktů dochází k plnému průtoku plynu skrz hrdlo. Ovšem při průběhu vypínání dochází k neustálým změnám průtoku plynu, jeho chlazení i délce oblouku. [13]

Sílnoproudý interval nejvíce ovlivňuje vzdálenost hrdla zhášecí trysky  $h_t$ . Energetická bilance oblouku je ovlivňována ve fázi, kdy se mění poloha kontaktu v hrdle zhášecí trysky. Ve stavu kdy je  $z_k > z_{ke}$ , je oblouk dlouhý a více tepelně působí, ovšem energetickou bilanci považujeme za nezávislou na vzdálenosti kontaktů. [13]

U interakčního intervalu je energetická bilance posuzována v závislosti na poloze kontaktů. Při změně stavu b) do stavu c) se průběh součinu tlaku a rychlosti kontaktů, závislost délky oblouku a strmost zotaveného napětí mění  $z_k$  od 0 do  $z_{ke}$ . Pro  $z_k > z_{ke}$  se mění úměrně pomalu zvětšováním délky oblouku. U jednostranného proudění je délka oblouku více závislá na  $z_k$ . Při dokončení pohybu kontaktů přestává proudit plyn a vypínací schopnost je rovna nule u všech typů, kromě typu „self blast“, jeho vypínací schopnost není okamžitá, ale vzhledem k času postupně snižující, to vše je způsobeno zpětnému proudění plynu z expanzní komory. [13]

Dielektrický interval je velmi ovlivněn vzdáleností kontaktů, je závislý i na poměru intenzity elektrického pole a tlaku  $E/p$ . Tepelné působení oblouku snižuje průrazné napětí. [13]

## 8. Závěr

Cílem práce bylo analyzovat a zhodnotit vypínací schopnost vypínačů s plynem SF<sub>6</sub>. Po krátkém úvodu do problematiky a popsání druhů spínačů je práce především v kapitole 4 zaměřena na tlakoplynové vypínače s plynem SF<sub>6</sub>. Z další kapitoly 5 a 6 je očividné, že při vypínacím procesu je vypínač závislý na mnoha faktorech, např. u interakčního intervalu je rozhodujícím faktorem strmost zotaveného napětí, u dielektrického intervalu, kde se zaobíráme průběhem a hodnotami zotaveného napětí a průrazného napětí. Z těchto hodnot můžeme dále určovat další parametry jako kupříkladu vypínací charakteristiku vypínače. Tyto parametry jsou opět závislé na dalších hlediscích, jako je typ zhášecí komory, způsob zhášení oblouku nebo tlak plynu v zhášecí komoře.

U svorkového zkratu, vznikne porucha, která je v blízkosti svorek vypínače, a proto můžeme s jistotou tvrdit, že v tomto případě dochází k nejvyšším hodnotám zkratového proudu, protože zde není omezení reaktancí ze strany vedení.

Blízký zkrat je charakterizován poruchou ve vzdálenosti několika set metrů, až jednotek kilometrů. Proto zde již uvažujeme rovnoměrně rozprostřené pasivní parametry, které omezují zkratový proud. Vlivem tlumených vln na vedení dojde ke kmitání napěťové vlny mezi vypínačem a místem zkratu. Vypínač na svorce u vedení bude namáhán velkou frekvencí v řádech kHz. Vzhledem k tomuto jevu dochází k nevypnutí blízkých zkratů, protože je vypínač namáhán napětím, které má velkou strmost.

K vypínání malých induktivních a kapacitních proudů dochází často, většinou při spínání transformátorů naprázdno, spínání nezatíženého venkovního vedení nebo při použití kondenzátorových baterií. Pokud mají vypínače velkou vypínací schopnost a vypínají se tyto nestabilní oblouky malých induktivních proudů, dochází k utržívání proudu před přirozenou proudovou nulou. Utržený proud vytvoří energii, a ta způsobuje přepěťové rázy, které namáhají vypínač. Namáhá se izolační pevnost vypínací dráhy a může docházet k opakovaným průrazům vypínače. Při vypínání malých kapacitních proudů dochází na části vedení a vypínače k zachování maximálního napětí, ale na druhé straně vypínače a zdroje se napětí mění s frekvencí a v určitém čase se na svorkách vypínače vlivem rozdílných napětí objeví napětí dvojnásobné. Toto napětí může způsobit vysoké elektrické namáhání a při překročení určité hodnoty dojde k průrazu nabití kapacity mezi svorkou vypínače a vedením na dvojnásobnou hodnotu napětí. Tento děj se neustále opakuje a při určitých podmínkách může dojít k porušení izolace.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Otto HAVELKA a kolektiv, *Elektrické přístroje*, SNTL nakladatelství technické literatury, Praha 1985 436 s.
- [2] Karel BÁRTA, Zdeněk VOSTRACKÝ a kolektiv, *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*, SNTL nakladatelství technické literatury, Praha 1983 445s.
- [3] Eva NAVRÁTILOVÁ., Kostka T. *Podklady pro SŠ*, Elektrotechnická Havířov, Elektrické přístroje, 2014  
[http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/esp/el\\_pristroje\\_esp.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/el_pristroje_esp.pdf)
- [4] *Podklady pro SŠ*, Elektrotechnická Zlín, elektrické přístroje 2014  
<https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=8552>
- [5] Vladimír VAJNAR, *Bakalářská práce – Rozbor vypínání velkých proudů při nesymetrických zkratech*, FEL ZČU v Plzni 2012
- [6] Pavel KOPAČKA., *Bakalářská práce - Studie vypínací schopnosti vypínačů vn/zvn*, FEL ZČU v Plzni 2016,  
[https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23109/1/bp\\_pavel\\_kopacka.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23109/1/bp_pavel_kopacka.pdf)
- [7] Jan LIBRA., *Elektrická zařízení 2*, učební texty pro elektrotechnické obory  
<http://web.sstzr.cz/download/cat1/elektrotechnika/ez2-eletricke-pristroje.pdf>
- [8] Miloslava TESAŘOVÁ., *Přednášky z předmětu KEE/EE2*, FEL ZČU v Plzni 2017
- [9] Pavel FUKAČ., *Bakalářská práce - Aktuální technický stav a diagnostika vypínačů vvn* 2012,  
[https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/2782/1/Bakalarska\\_prace\\_Pavel\\_Fukac\\_vypinac\\_e\\_vvn.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/2782/1/Bakalarska_prace_Pavel_Fukac_vypinac_e_vvn.pdf)
- [10] Jan SEDLÁČEK., *Doktorská disertační práce - Stacionární a dynamické napěťové namáhání vypínačů vn/vvn*, FEL ZČU v Plzni 1999
- [11] *SF6 Circuit Breaker Working Principle* (online), vytvořeno 7.2015  
<http://www.skm-eleksys.com/2012/02/sf6-circuit-breaker-working.html>
- [12] Vladimír VAJNAR, *Diplomová práce - Spolehlivost vypínačů VVN včetně mimořádných stavů*, FEL ZČU v Plzni 2014
- [13] Zdeněk VOSTRACKÝ, *Doktorská disertační práce – Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů a jejich užití v praxi*, ČVUT Praha, FEL – Škoda, Plzeň 1986