

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Ing. Roman Samek

**STUDIUM DYNAMICKÝCH JEVŮ PŘI ZHÁŠENÍ
ELEKTRICKÉHO OBLOUKU V SF₆**

**STUDY OF DYNAMIC PHENOMENA
DURING SWITCHING PROCESS
OF SF₆ ELECTRIC ARC**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. Ing. Zdeněk Vávra, CSc.

Oponenti: RNDr. Milan Hrabovský, CSc.

Prof. RNDr. Vratislav Kapička, DrSc.

Datum obhajoby: 27. 5. 2003

Klíčová slova: elektrický oblouk, black-box model, interval okolo nuly proudu – interakční interval, zbytkový proud

Key words: an electric arc, a black-box model, an interval in the vicinity of the current zero, post-arc current

Místo, kde je k dispozici disertační práce: vědecké oddělení FEKT VUT v Brně

Práce byla řešena v rámci Výzkumného záměru MSM 262200010 – Výzkum zdrojů, akumulace a optimalizace využití elektrické energie v ekologických aplikacích.

© Roman Samek, 2003

ISBN 80-214-2423-0

ISSN 1213-4198

Obsah

<u>1</u>	<u>Úvod</u>	5
1.1	<u>Současný stav</u>	5
1.2	<u>Cíle práce</u>	6
<u>2</u>	<u>Tři základní intervaly vypínacího pochodu</u>	6
<u>3</u>	<u>Cassieho teorie vypínacího oblouku</u>	7
<u>4</u>	<u>Mayrova teorie vypínacího oblouku</u>	8
<u>5</u>	<u>Experimentální zařízení</u>	10
5.1	<u>Experimentální obvod</u>	10
5.1.1	<u>Silová část</u>	10
5.1.2	<u>Ovládací část</u>	11
5.1.3	<u>Měřicí část</u>	11
5.2	<u>Experimentální model vypínače</u>	12
<u>6</u>	<u>Pokusy na experimentálním zařízení</u>	13
6.1	<u>Celý vypínací proces</u>	13
6.2	<u>Interval v okolí nuly</u>	14
<u>7</u>	<u>Vyhodnocení pokusů a dat z interakčního intervalu</u>	15
<u>8</u>	<u>Teorie modelování elektrického oblouku</u>	17
8.1	<u>Black-Box (BB) model</u>	18
8.2	<u>Praktická aplikace black-box modelů</u>	18
<u>9</u>	<u>Aplikace black-box modelu na naše podmínky</u>	19
<u>10</u>	<u>Porovnání reálných pokusů s black-box modelem</u>	20
<u>11</u>	<u>Závěr</u>	23
<u>12</u>	<u>Použitá literatura</u>	25
<u>13</u>	<u>Abstract</u>	27
<u>14</u>	<u>Curriculum vitae</u>	28

1 Úvod

Počátky této práce spadají do roku 1994, kdy se na tehdejší Ústavu elektrických strojů a přístrojů FEI VUT Brno započalo řešení projektu GA ČR 102/94/0430 „Rozvoj metod vyšetřování interakce elektrického oblouku s obklopujícím prostředím“. Na tento projekt dále navazoval projekt GA ČR 102/97/0253 „Dynamické jevy interakce elektrického oblouku s obklopujícím prostředím“. V rámci těchto grantových projektů byly postupně připravovány podmínky pro náročnou experimentální činnost v oblasti studia jevů zhášení elektrického oblouku hořícího v modelu zhášedla spínače s SF₆ s vlastní zhášecí energií.

Experimentální práce probíhaly v Laboratoři spínacího oblouku ÚESP na Kraví hoře na experimentálním modelu spínače s SF₆, který byl navržen a realizován v rámci semestrálních projektů [7 a 8] a diplomové práce [5].

Je zcela zřejmé, že tato náročná experimentální činnost není a nemůže být individuální záležitostí. Rád bych tedy vyzvedl práci celého kolektivu pracovníků Laboratoře a tímto jim za pomoc a spolupráci poděkoval.

Práce je zaměřena na studium jevů v těsném okolí proudové nuly se zvláštním zřetelem na průběh zbytkového proudu, který charakterizuje kvalitu zhášecího procesu v dané konfiguraci zhášedla. Potíž v přesné diagnostice tohoto problému však spočívá v tom, že počáteční podmínky celého děje jsou dány předchozím hořením oblouku. Přitom elektrický oblouk je fenomén, který nepodléhá téměř žádné pravidelnosti a jeho chování je stochastické.

V následujících kapitolách budou uvedeny teoretické podklady pro řešení vytyčeného problému, popsány podmínky experimentu, uvedeny získané výsledky spolu s jejich vyhodnocením a v prvním přiblížení také jejich aplikace ve matematicko fyzikálním modelu elektrického oblouku.

1.1 Současný stav

Problematikou studia elektrického oblouku ve vypínačích vn a vvn se zabývá celá řada světových pracovišť, jak na univerzitách, tak zejména ve výzkumných střediscích renomovaných firem (ABB, Siemens, atd.) Postupně byly studovány všechny etapy hoření elektrického oblouku. Avšak největší zájem byl a je soustředěn na interval těsného okolí nuly proudu, ve které dochází k uhasnutí oblouku.

Většina požívaných metod měření proudu je založena na aplikaci Rogowského cívky s následujícím matematickým zpracováním signálu [6, 9, 10 a 11]. Přesnost těchto metod je zejména dána přesností konstanty Rogowského cívky. Měření napětí je obvykle prováděno pomocí děliče napětí.

Práce z poslední doby však ukazují na možnost přímého měření proudu s použitím bezindukčního (koaxiálního) bočnicku. Signál z bočnicku je spolu se signálem napětí (opět dělič napětí) zaznamenáván digitálním osciloskopem s vysokou frekvencí vzorkování. Následným matematickým zpracováním signálu je

možné získat velmi přesné záznamy proudu [12 a 13] v korelaci s napětím, které následně slouží pro aplikaci ve vhodném modelu oblouku typu black-box.

S vědomím možnosti moderního vybavení Laboratoře spínacího oblouku byla jako metoda experimentu přijata možnost přímého měření proudu a napětí v okolí nuly proudu.

1.2 Cíle práce

Metoda řešení je experimentální s následným matematickým zpracováním výsledků a jejich aplikaci v teoretickém modelu.

Tato metoda slouží k naplnění cílů práce, které byly stanoveny takto:

- Ověřit aplikovatelnost přímého měření proudu a napětí v okolí nuly proudu při zhášení elektrického oblouku v modelu spínače s SF₆.
- Provést sérii experimentů s následným zpracováním naměřených dat a jejich vyhodnocení.
- Určit velikost a časový průběh zbytkového proudu.
- Vybrat vhodný typ fyzikálně matematického modelu elektrického oblouku typu black-box.
- S využitím experimentálně získaných dat ověřit možnost modelování vypínacího procesu.
- Srovnat teoretické a experimentální výsledky.

2 Tři základní intervaly vypínacího pochodu

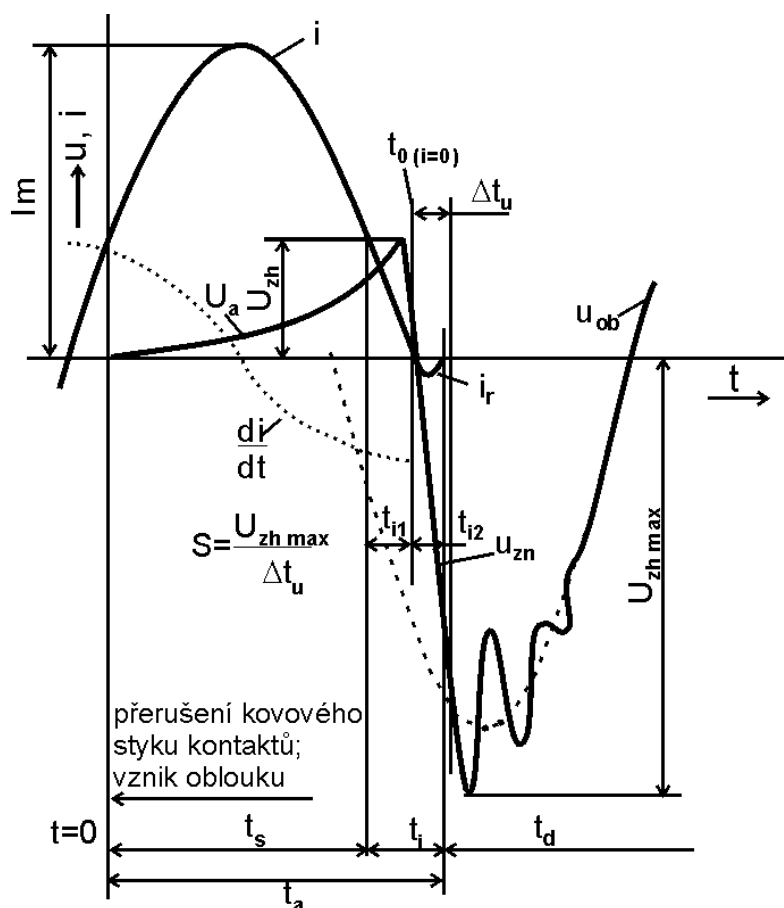
Vypínací pochod lze z hlediska posuzování vypínacího pochodu ve zhášecí komoře rozdělit do tří základních intervalů (Obr. 1) [1, 2, 4, 25, 26, 27]. Tři základní intervaly jsou:

- silnoprůdný interval
- interval okolo nuly proudu (interakční interval)
- dielektrický interval

Rozdělení vypínacího pochodu do těchto intervalů umožňuje snadněji specifikovat základní kritéria, kterým musí zhášecí komora vyhovovat při vypínání.

Vypínací pochod ve zhášecí komoře závisí v každém intervalu poněkud jinak na parametrech zhášecí komory. Při vypínání střídavého proudu charakter proudění plynu závisí nejen na časově proměnlivém zdvihu kontaktů, druhu plynu a tlakových poměrech, ale i na procházejícím proudu, přičemž všechny veličiny jsou vzájemně závislé. Hranice intervalu lze určit jen přibližně, protože jsou závislé na kmitočtu proudu a na časové konstantě oblouku. Časová konstanta oblouku je proměnlivá nejen s velikostí proudu, ale závisí i na uspořádání zhášecí komory.

Ideální vypínač by měl mít plnou vodivost před nulou proudu a žádnou vodivost po nule proudu, v realu tomu tak není.



Obr. 1: Základní intervaly vypínacího pochodu; t_s silnoproudý 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, di/dt derivace proudu podle času, i_r zbytkový proud, 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, Δt_u doba průchodu proudu nulou do okamžiku protknutí tečny obalující křivku u_{zn} v hodnotě $U_{zn \max}$ $(du/dt)_{i=0}$ okamžitá strmost zotaveného napětí v nulové hodnotě proudu;

3 Cassieho teorie vypínacího oblouku

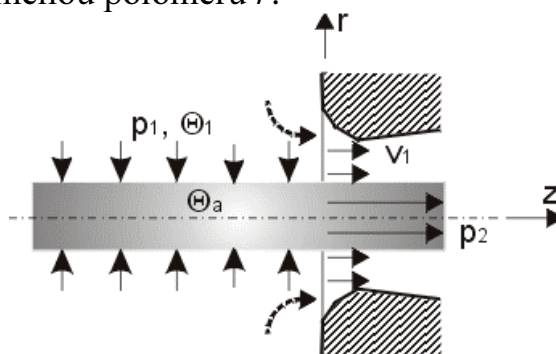
Výchozí rovnicí Cassieho teorie je bilanční rovnice dynamického oblouku

$$\frac{dQ}{dt} = u_a i - \Delta P \quad (0.1)$$

Při řešení se uvažují tyto základní předpoklady:

- ztráty ΔP jsou tepelné ztráty prouděním (konvekci) a realizují se entalpií výfukových plynů z aktivních částí obloukového sloupce Obr. 2. Směr proudění je souhlasný s osou obloukového sloupce. napětí oblouku U_a se považuje za konstantní.
- průměr oblouku se mění s proudem a sloupec oblouku má tvar válce se zmenšujícím se poloměrem s kruhovým průřezem πr^2 .
- měrná elektrická vodivost σ je úměrná teplotě T akumulované v plazmatu a je v každém místě stejná.

- d) teplota T i elektrická vodivost G se s časem nemění, změna tepelného obsahu se mění jen se změnou poloměru r .



Obr. 2: Cassieův model kontrakce obloukového sloupce prouděním plazmatu z aktivního obloukového sloupce

Uvedené předpoklady vyhovují pro popis vypínacího oblouku v okolí maximální hodnoty proudu, kdy napětí oblouku je přibližně konstantní a průměr oblouku je velký; uplatní se tedy odvod ztrát prouděním z aktivní části obloukového sloupce.

Za těchto okolností lze psát Cassieho rovnici:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_a i}{\Delta P} - 1 \right) \quad (0.2)$$

kde τ představuje časovanou konstantu

$$\tau = \frac{c}{\kappa} \quad (0.3)$$

4 Mayrova teorie vypínacího oblouku

Výchozí rovnicí Mayrovy teorie je opět bilanční rovnice dynamického oblouku

$$\frac{dQ}{dt} = u_a i - \Delta P \quad (0.4)$$

kde Q je tepelný obsah oblouku [J]

u_a napětí oblouku [V]

i proud procházející obloukem [A]

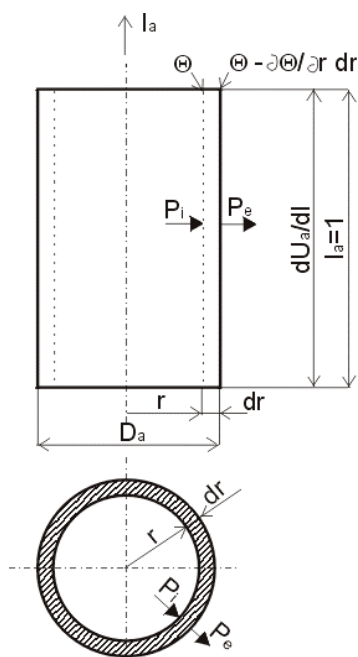
ΔP ztráty odváděné z oblouku do okolí [W]

Při řešení se uvažují tyto základní předpoklady:

- a) ztráty odváděné z oblouku jsou zprostředkovány vedením tepla z jádra oblouku k jeho povrchu (v příčném směru) a pak z povrchu oblouku se ztráty předají do okolního studeného plynu. Zanedbávají se ztráty vedením v axiálním směru, které pro oblouk chlazený osově proudícím plynem tvoří asi jen 5% celkových ztrát. Na Obr. 3 je schématicky nakreslena část válcového oblouku.

- b) Mayr předpokládá, že ztráty oblouku jsou přibližně konstantní. Pro stacionární oblouk je v základní bilanční rovnice (0.4) $dQ/dt = 0$.

$$\Delta P = \Delta P_s = konst = U_{as} I \quad (0.5)$$



Obr. 3: Schematický náčrt válcové části oblouku

- c) Další závislost, kterou Mayr odvodil, se týká vztahu mezi tepelným obsahem a vodivostí oblouku

$$G = konst \cdot \exp\left(\frac{Q}{Q_s}\right) \quad (0.6)$$

kde Q_s je charakteristické teplo, po jehož dodání se vodivost obloukového sloupce zvětší v poměru 1:e. Ze vztahu plyne, že vodivost vzrůstá exponenciálně.

Výsledkem je opět diferenciální rovnici dynamického oblouku ovšem Mayrova:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_a i}{\Delta P} - 1 \right) \quad (0.7)$$

kde zavedeme časovou konstantu τ :

$$\tau = \frac{Q_s}{\Delta P} \quad (0.8)$$

Je patrné že Cassieho a Mayrova teorie nemohou platit současně, vystává tedy otázka, která z obou teorií lépe vystihuje skutečný stav a především, která z nich je vhodnější pro řešení vypínacího pohodu.

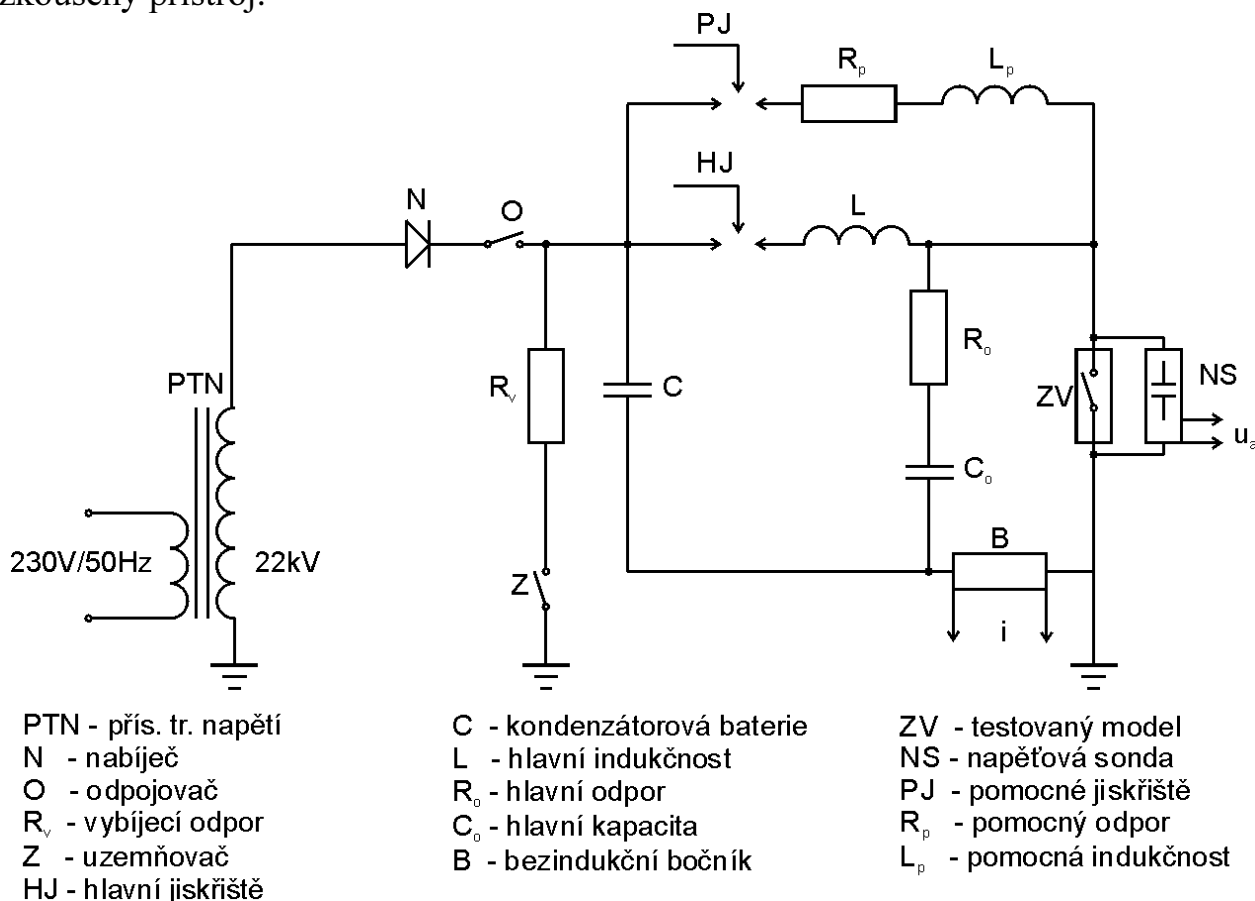
Mayrova teorie lépe popisuje interakční interval, Cassieova teorie však lépe popisuje interval silnoprůdý.

V předchozím textu uvedené modely představují základ pro jejich praktické aplikace. Z již uvedeného rozboru vyplývá vhodnost Mayrova modelu k popisům k popisům jevů v interakčním intervalu, a proto také řada pracovníků uveřejnila své vlastní modely Mayrovského typu. Těchto modelů je celá řada. A vhodnost jejich použití byla předmětem činnosti pracovní skupiny WG 13.01. CIGRE [14]. Výsledkem několikaleté práce mezinárodní skupiny odborníků byl hluboký a kritický rozbor použitelnosti black-box modelů pro praktickou aplikaci. Jeden za závěrů poukazuje na vhodnost black-box modelu pro posouzení meze vypínací schopnosti

na základě zkoušek. Znamená to, že výsledky experimentu jsou vstupními daty pro black-box model.

5 Experimentální zařízení

Pod pojmem experimentální zařízení vystupuje zkušební obvod, ve kterém figuruje jak jeho silová (výkonová) část, tak i část ovládací a měřicí. V silové části je zapojen zkoušený přístroj.



Obr. 4: Schéma zapojení hlavního odvodu s experimentálním modelem

5.1 Experimentální obvod

Pro účely této práce bylo využito zařízení Laboratoře spínacího oblouku dislokovaném na Kraví hoře. Bohužel, během této disertační práce byla v polovině roku 2000 zastavena její činnost a laboratoř byla postupně přestěhována do nově vybudovaného prostoru v laboratoři elektrických přístrojů UVEE na ulici Technická. Zdroj zkratového proudu byl modernizován a v současné době je laboratoř připravována k provozu.

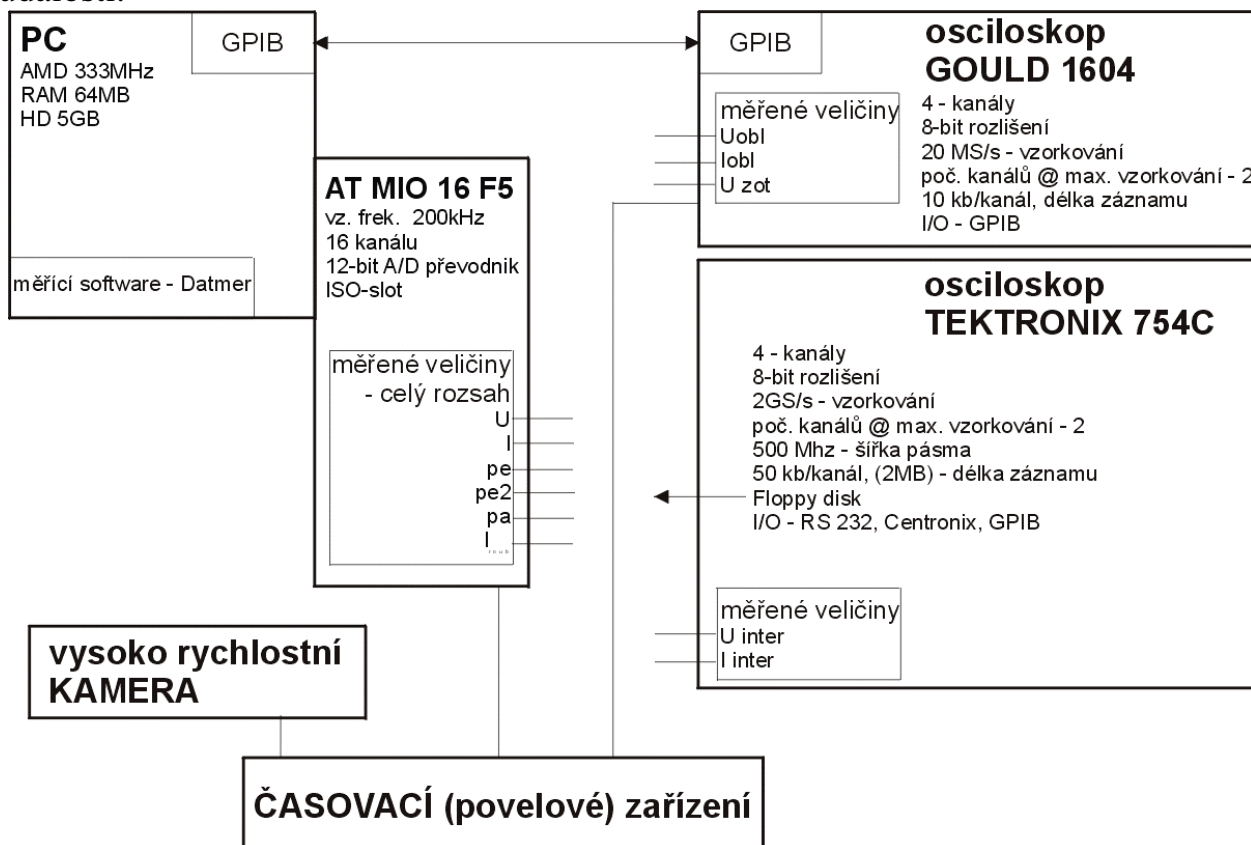
5.1.1 Silová část

Použití kondenzátorové baterie, jako zdroje a kmitavého proudu při vysokém napětí v krátkodobém režimu (1 fázově), je rozšířený způsob vybavení výzkumných

laboratoří zabývajících se problematikou elektrického oblouku. V naší Laboratoři spínacího oblouku, je také použit obvod koncipovaný jako sériový RLC obvod podle Obr. 4.

5.1.2 Ovládací část

Časová posloupnost operací při měření veličin vypínacího procesu, si vyžaduje speciální ovládací obvod, který v přesně specifikovaném čase spouští jednotlivé události.



Obr. 5: Schematický náčrt ovládacího a měřicího obvodu

Ovládací obvod musí synchronně spouštět proud do obvodu s experimentálním modelem spínače, což je realizováno pomocným a poté hlavním jiskřištěm, přičemž je nutné předtím poslat signál pro vypnutí modelu. Dále v časové souslednosti jsou ovládány měřicí přístroje pro záznam a sběr dat, to vše zabezpečuje časovací (povelové) zařízení. Při sledování elektrického oblouku pomocí vysoko rychlostní kamery, vysílá spouštěcí signál do časovacího zařízení ovládací obvod kamery. Nastavitelné zpoždění u povelového zařízení je od 1 μ s do 999 ms po 1 μ s.

5.1.3 Měřicí část

Měřicí část je velmi úzce spjata s ovládacím obvodem a pracují společně. Zapojení je znázorněno na Obr. 5.

Zkušební model umožňuje měřit elektrické a neelektrické veličiny klasickou metodou pomocí oscilografů a dále je prováděno měření průběhů napětí a proudu

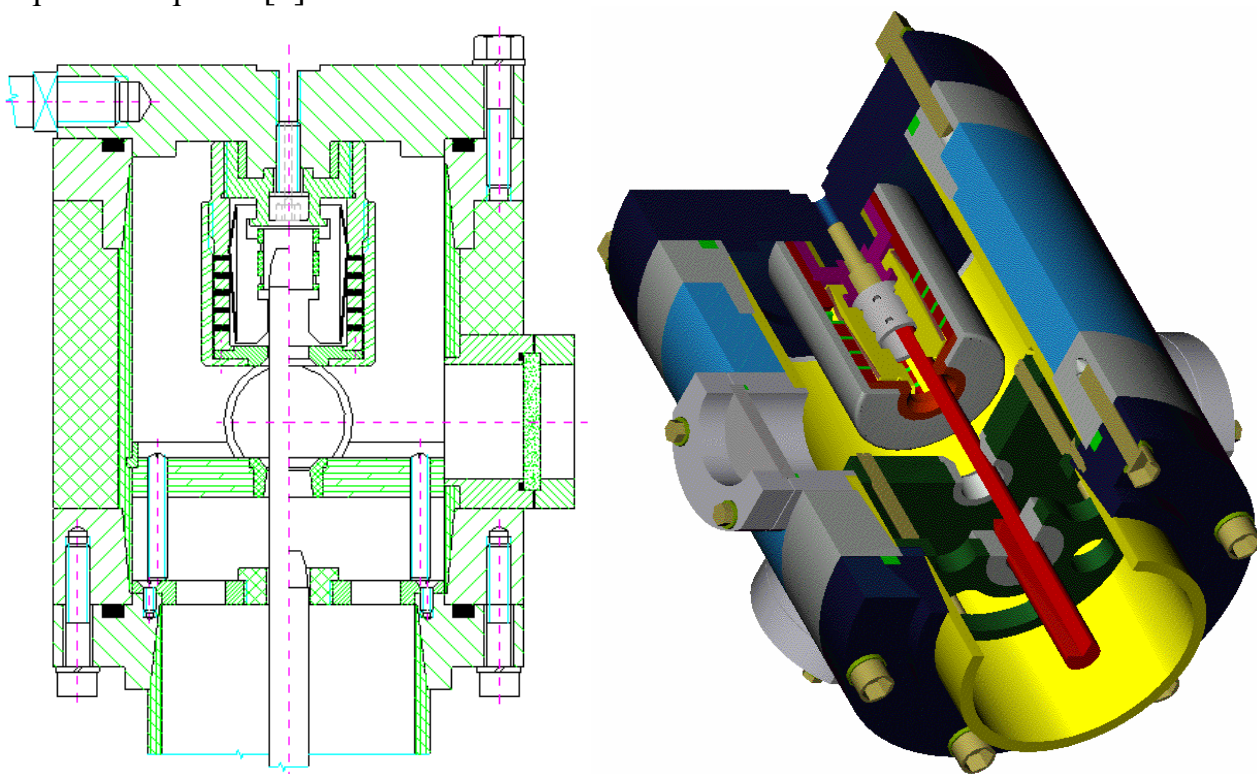
v okolí proudové nuly s využitím digitálních záznamníků rychlých přechodových dějů s následným zpracováním na počítači.

Měřicí obvod má tři hlavní části, které jsou určeny k měření v daném čase vypínacího procesu.

První část je tvořena měřicí kartou AT MIO16 F5, která měří vypínací proces v celém rozsahu. Měřenými veličinami jsou proud I , napětí U , pohyb roubíku l a tři tlaky (akumulační p_a , expanzní p_e , p_{e2}). Druhá část je tvořena osciloskopem Gould 1604, který je spojen přes GPIB a plně komunikuje s PC. Tento osciloskop zaznamenává obloukové napětí U_{obl} a proud I_{obl} a napětí zotavené U_{zot} . Poslední třetí část je určena k měření napětí U_{int} a proudu I_{int} v okolí nuly. Záznam je proveden pomocí osciloskopu Tektronix 754C. Celý měřicí proces je řízen PC a běží pod softwarem Datmer.

5.2 Experimentální model vypínače

Částečný řez zhášecí komory navrženého experimentálního modelu spínače SF₆ využívajícího zcela vlastní energii obvodu ke zhášení elektrického oblouku je znázorněn na Obr. 6 ve 2D a 3D včetně provedených úprav pro diagnostiku elektrického oblouku. Tento experimentální model spínače byl sestrojen v rámci diplomové práce [5].



Obr. 6: Řez experimentální zhášecí komory ve 2D a 3D

Takže v podstatě jde o jedno tlakovou zhášecí komoru, s jednosměrným ofukováním, kde jako zhášecí medium figuruje SF₆ s plnicím přetlakem 0,42 MPa. Tlakový spád dosahuje hodnot v těchto rozmezích $p_a/p_e = 0,67/0,57$ až $0,92/0,72$ MPa.

V neposlední řadě je model uzpůsoben pro aplikaci optických diagnostických metod. V tělese zhášecí komory jsou umístěny tři průzory po 90°, které umožňují pohled napříč akumulacním prostorem a v jednom kolmém směru.

6 Pokusy na experimentálním zařízení

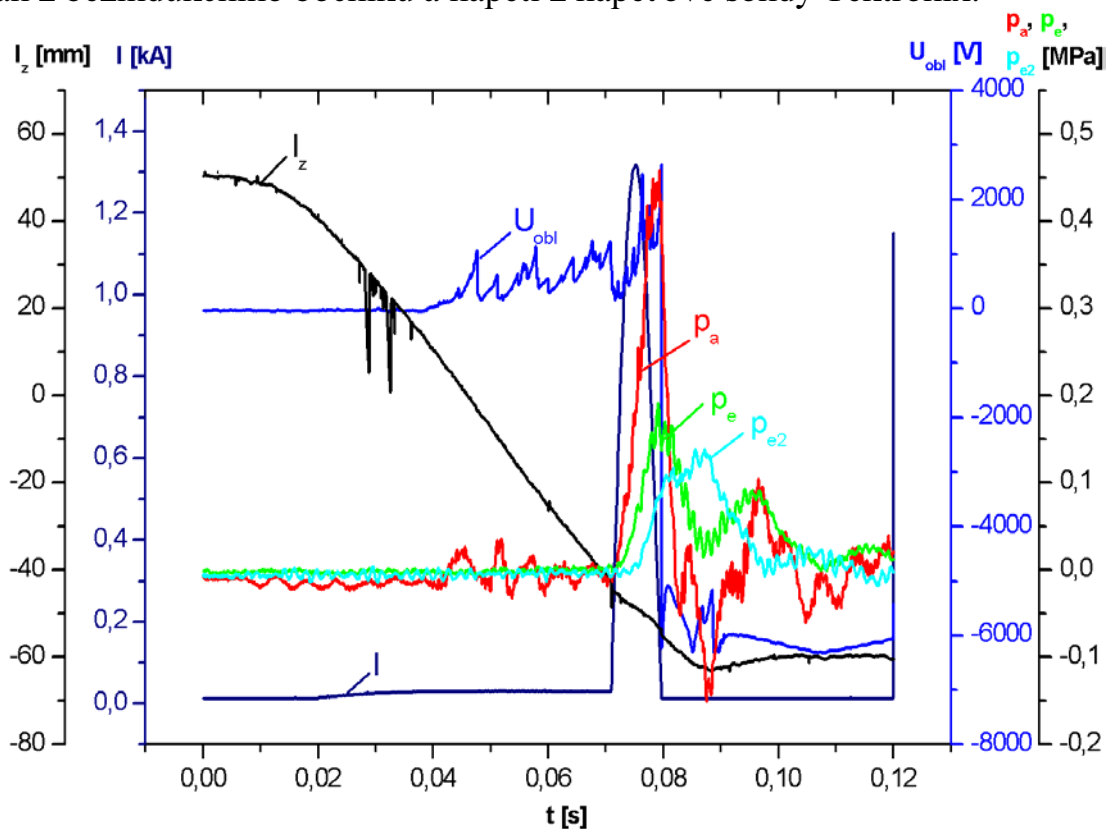
Provedení zkoušek na vypínači a následné jejich vyhodnocení je jednou z prvních oblastí, kdy se začíná využívat teorie vypínací elektrického oblouku.

V podmínkách Laboratoře spínacího oblouku UVEE FEKT VUT byla ověřena přímá metoda měření v okolí nuly proudu na modelu spínače s SF₆ s vlastní zhášecí energií.

Pomocí měřicí techniky, která byla popsána v kapitole 5.1.3 byly provedeny úspěšné záznamy, které byly dále podrobeny analýze. Záznamy dávají informace jak o celém průběhu veličin během vypínacího procesu, tak hlavně poskytují informace z intervalu okolo nuly.

6.1 Celý vypínací proces

Celý vypínací interval byl změřen za pomoci měřicí karty, kde jsou zaznamenány tyto veličiny: proud, napětí, tlaky a pohyb roubíku, jak je vidět na Obr. 7. Proud byl snímán z bezindukčního bočnicku a napětí z napětové sondy Tektronix.



Obr. 7: Záznam vypnutí z měřicí karty

6.2 Interval v okolí nuly

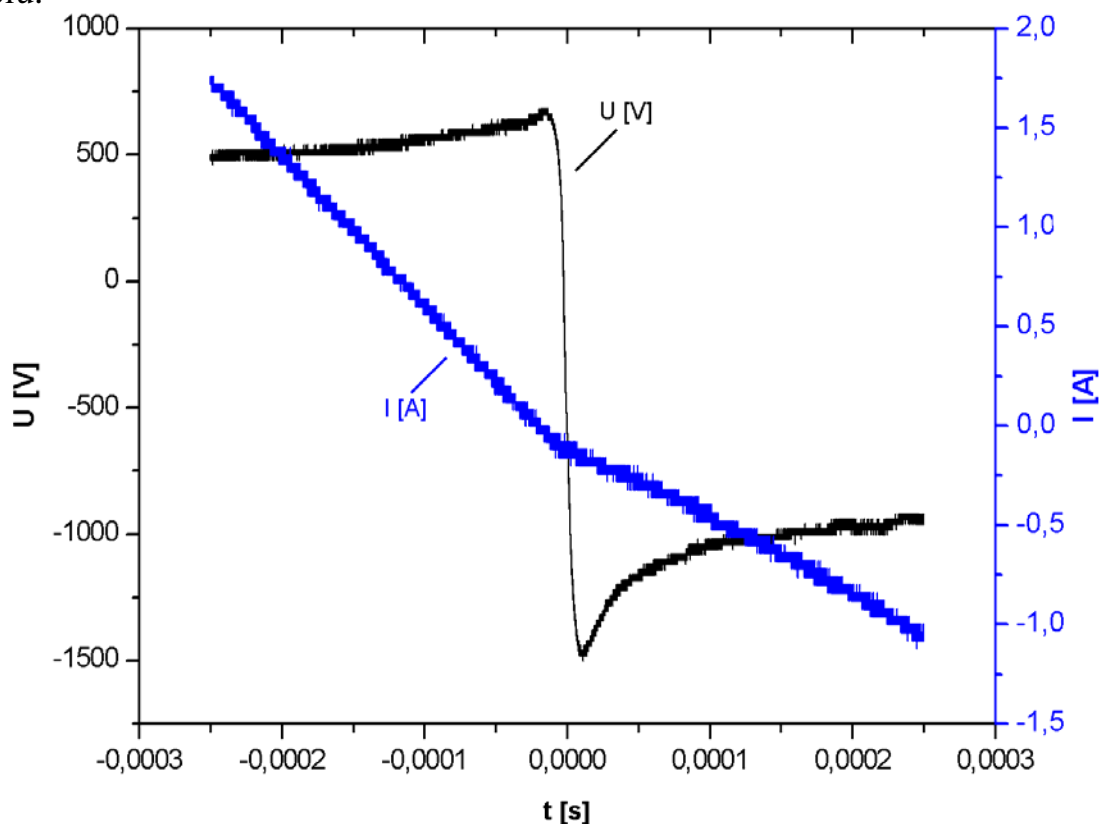
Interakční část neboli část okolo nuly byla měřena, jak bylo zmíněno v kapitole 5.1 pomocí digitálního osciloskopu Tektronix 754C, ke kterému byla připojena napěťová sonda Tektronix a pro proud stejně jako při měření celého průběhu (silnoproudého intervalu), byl použit bezindukční bočník. Osciloskop byl nastaven právě pro rychlý děj okolo nuly, vhodné nastavení osciloskopu bylo časově dosti náročné a požadovalo to provedení několika experimentů.

S úspěchem byly provedeny záznamy se vzorkováním 1,6 GS, což představovalo úctyhodných 50 000 vzorků na čas o 30 μ s.

Naměřený proud i a průběh napětí u v intervalu okolo nuly vidíme na obrázku Obr. 8, kde je průběh termického selhání.

Pro tuto práci bylo důležité naměřit proud a napětí okolo nuly viz Obr. 9, při úspěšném vypnutí, kde je pak možné určit po průchodu proudů přirozenou nulou zbytkový proud, který ve velké míře ovlivňuje vypnutí/selhání vypínače. Ideální případ vypnutí si lze představit tak, že v silnoproudém intervalu na oblouk vysokou vodivost a pak při vypnutí, to jest po nule proudu jeho vodivost skočí na nulu a vypínačem přestane protékat proud. Jak je vidět z obrázků Obr. 9, tak tomu tak není. Vlivem tepelné setrvačnosti (plazmatu a teplých elektrod) má oblouk zbytkovou vodivost a tomu odpovídající zbytkový proud.

Naměření termického selhání je také velmi důležité pro porovnání veličin a možnost jejich ohodnocení, navíc bude důležitou pomůckou při tvorbě black-box modelu.

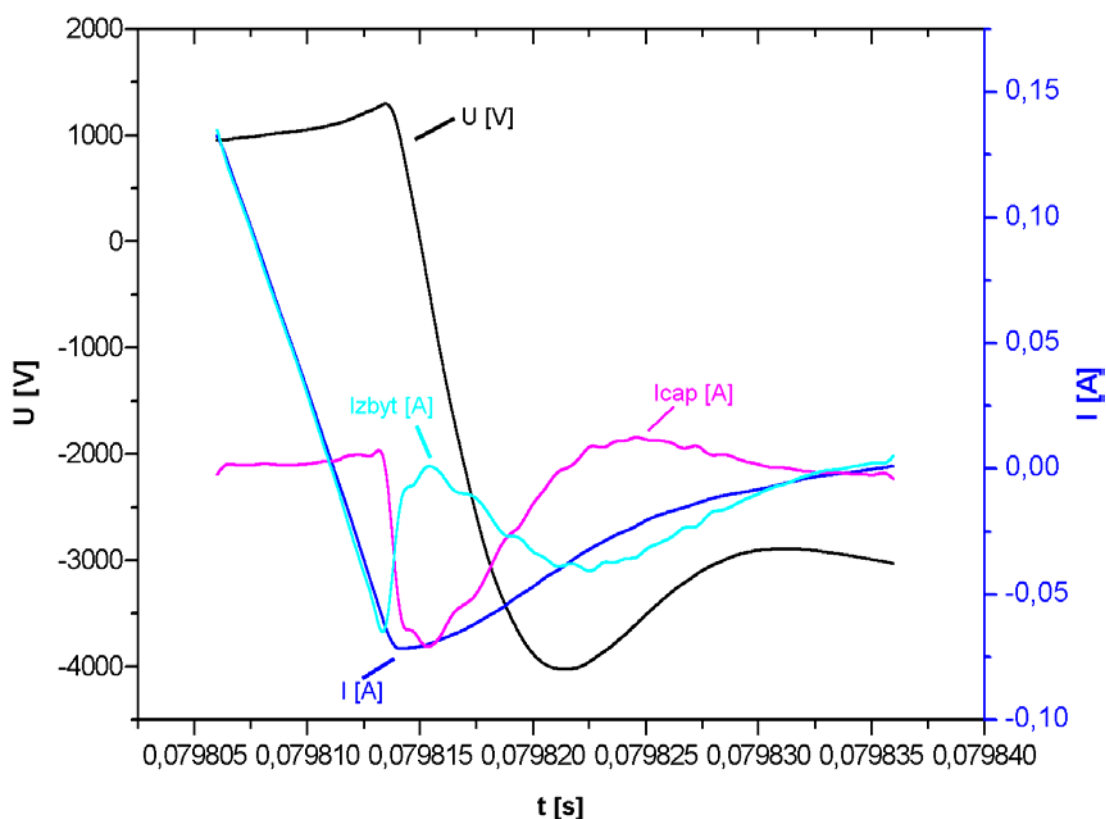


Obr. 8: Naměřený průběh proudu a napětí v okolí nuly při prohoření

7 Vyhodnocení pokusů a dat z interakčního intervalu

S upravenými (vyhlazenými) průběhy napětí a proudu mohla být provedena analýza těchto veličin v okolí nuly. Jde o zjištění parazitní kapacity a s tím spojeného kapacitního proudu s následným určením zbytkového proudu jejich zobrazení je na Obr. 9.

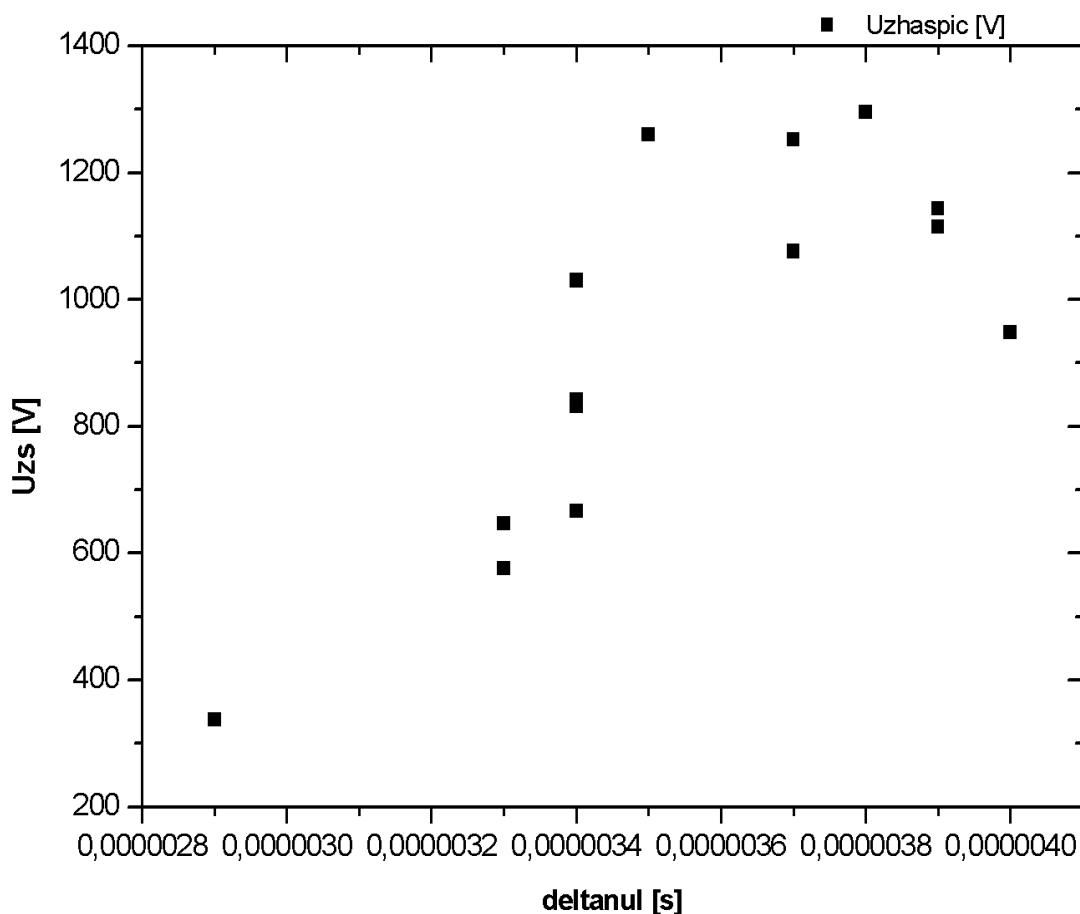
Na Obr. 9 je průběh zbytkového proudu, ten skutečně začíná v okamžiku, kdy přechází zhášecí špička do zotaveného napětí. Na záznamu proudu je vidět jak nejdříve prochází nulou do záporných hodnot, a pak se vrací zpět k nule. V tom okamžiku je považován za zbytkový proud. Byla provedena závislost velikosti zhášecí špičky na deltanul (což je časový rozdíl průchodu proudu a napětí nulou), z níž je patrné, že velikost zhášecí špičky ovlivňuje deltanul, čím větší zhášecí špička tím větší deltanul viz Obr. 10.



Obr. 9: Průběh vyhlazeného, kapacitního, zbytkového proudu a napětí v okolí nuly proudu

Ze zaznamenaných dat bylo možné určit strmosti napětí su a proudu si . Obě tyto veličiny pak byly vyneseny do grafu společně s celkovou dodávanou energií do oblouku Obr. 11. Z grafu je patrná ta skutečnost, že vypínač selhal v případech, kdy byl méně namáhán. V tomto okamžiku je nutné připomenout, že experimenty probíhaly na modelu spínače s SF₆ s vlastní zhášecí energií (self-blast) s jedno tlakovou zhášecí komorou. Což vysvětluje, proč tomu tak je. Pokud vypínače s vlastní zhášecí energií nemají dostatek energie na uhašení oblouku, tj. energie dodávané, tak vypínač selže. Narozdíl od ostatních druhů vypínačů, kde s rostoucí dodávanou (vypínanou) energií roste pravděpodobnost selhání. Určitě by stálo za

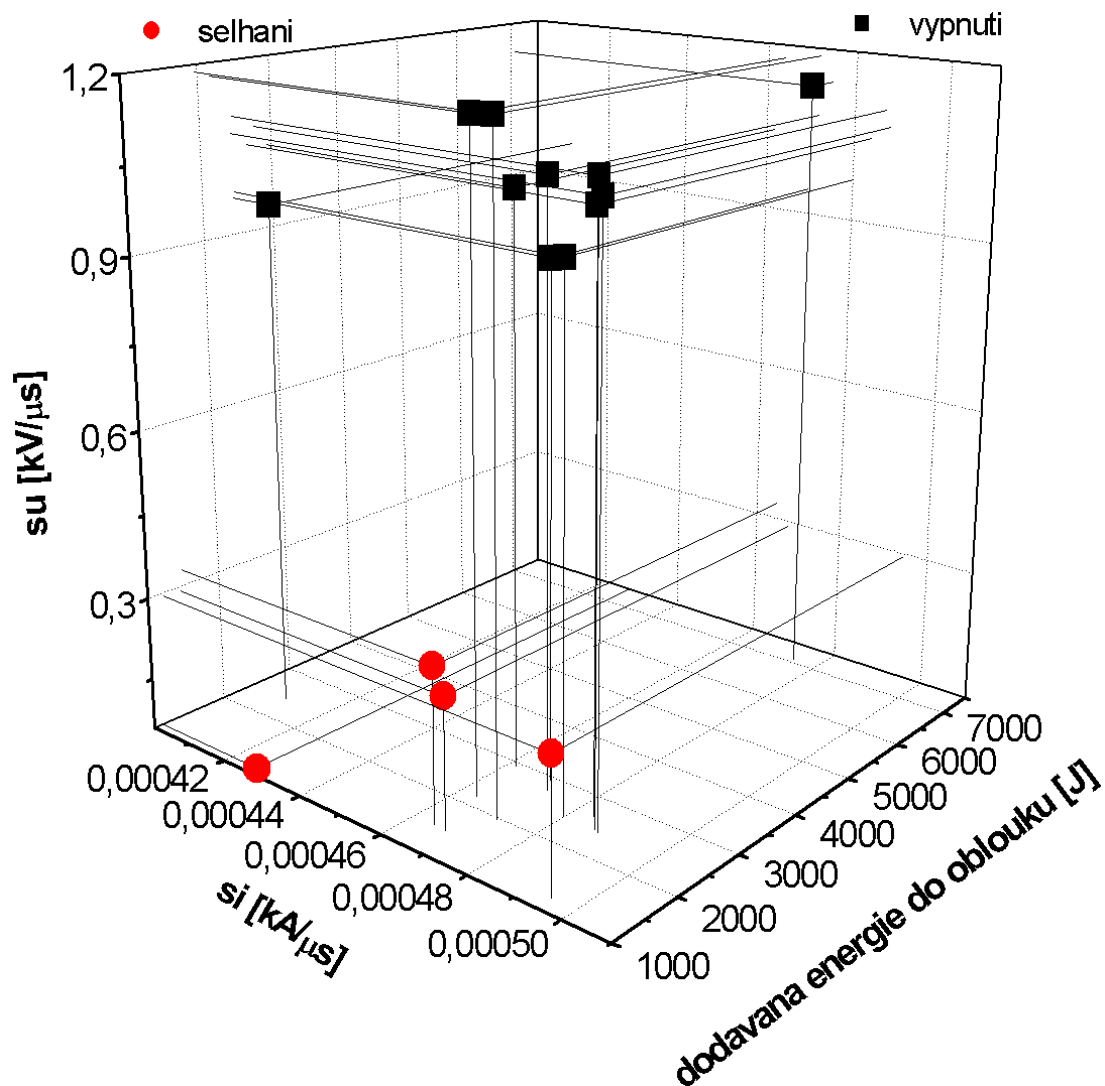
pokus namáhat vypínač do zničení, pokud by ho vůbec bylo možné zničit. Mez vypínací schopnosti je určena maximálním termodynamickým namáháním, tj. tlakovými poměry v jednotlivých prostorách vypínače.



Obr. 10: Závislost napětí zhášecí špičky na rozdílu průchodu proudu a napětí nulou

Tato vlastnost vypínačů s vlastní zhášecí energií by je měla řadit podstatně výše než ostatní, poněvadž s rostoucími hodnotami proudu a napětí a strmostí roste jejich vypínací schopnost.

Zajímavější by byla hodnota nashromážděné energie v oblouku, tj. energie dodávané (vypínané) minus energii odvedené do okolí z oblouku, během celého vypínacího procesu. A navíc znát chování (pohyb a tvar oblouku). Ale takové to zkoumání již přesahuje rámec této práce.



Obr. 11: Závislost strmosti proudu a napětí spolu celkovou dodanou energií do oblouku, s rozlišením, kdy vypínač úspěšně vypnul či selhal

8 Teorie modelování elektrického oblouku

Chování elektrického oblouku ve vypínačích se dá vysledovat, jak cestou skutečných testů na vypínači, tak i modelováním. První volba je však, jak časově, tak i finančně náročná, protože předpokládá uskutečnění dostatečného množství testů. Prerušeni proudu bychom mohli považovat za statistický proces a při uskutečnění velkého množství testů, bychom získali platné výsledky.

Obvykle se můžeme setkat s dvěma základními typy modelů elektrického oblouku. První typ řeší základní rovnice obloukového plazmatu a popisuje jevy v plazmatu (oblouku). Tento typ modelu se obecně nazývá fyzikální model. Zatímco druhý typ modelu je založen pouze na rovnici obloukového napětí a proudu bez dalších informací popisující procesy v elektrickém oblouku. Zejména tento druhý typ modelu, který se nazývá black-box, je použit pro modelování průběhu elektrického oblouku a je popisován v této práci viz. kapitola 8.1.

8.1 Black-Box (BB) model

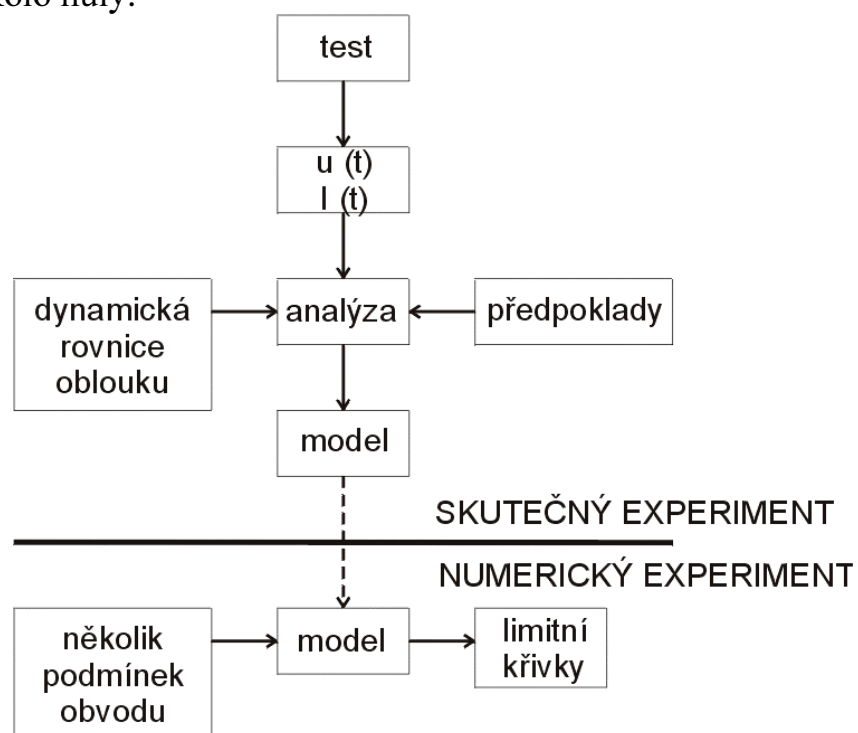
Black-box (BB) modely slouží k popisu interakce vypínacího oblouku s odpovídajícím elektrickým obvodem při vypínacím procesu. V případě BB je elektrické chování důležitější než samotný fyzikální proces hořícího oblouku, a proto BB modely musí být více považovány za matematický popis než fyzikální popis.

Většina BB modelů vychází z rovnice časové změny vodivosti – dynamické rovnice oblouku (0.7) její odvození bylo popsáno v kapitole 4 a byly publikovány v roce 1939 A. M. Cassim a 1943 O. Mayrem. Ovšem jejich uplatnění v BB modelech se stalo zajímavým až v 70 letech s vývojem měřicích zařízení a počítačů.

8.2 Praktická aplikace black-box modelů

Podle Obr. 12 je prováděna praktická aplikace vybraného BB modelu, a ta je rozdělena do dvou základních částí a to: skutečný experiment ve kterém jsou provedeny samotné testy na jejich základě jsou pak určeny parametry oblouku a jsou vstupními daty pro BB model, to vše za jistých předpokladů. Tato první část je provedena na základě naměřených průběhů napětí a proudu. Ve druhé části jsou prováděny numerické experimenty, jejich výstupem kupříkladu mohou být limitní meze vypínače.

V první části, kdy jsou prováděny testy a určovány parametry oblouku, tak rozhodujícím faktorem je samotné měření jednotlivých veličin. V kapitole 5.1.3 jsou popsány všechny měřicí členy, včetně měřícího zařízení, které zpracovává data z intervalu okolo nuly.



Obr. 12: Praktická aplikace black-box modelu

Podstatou BB modelů je využití průběhu napětí a proudu při vypínacím procesu ve vypínači a diferenciální rovnicí elektrického oblouku (0.7). Pak takový model může matematicky popisovat chování vypínacího procesu. Zpravidla BB model může být aplikován pro nalezení limitních mezí vypínače, popsání vlivu obvodu na limitní meze vypínače (paralelní kapacita, amplituda), získání statistických vlastností limit vyhodnocením několika testů, na problémy zkratů, předpovědi předčasného přerušení proudu nebo pro vzájemné porovnání konstrukčních variant vyvíjených přístrojů.

9 Aplikace black-box modelu na naše podmínky

Po teoretické analýze z celé řady literatury, byla pro naše podmínky vybrána dynamická rovnice elektrického oblouku v tomto tvaru:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{T(g)} \left(\frac{u \cdot i}{P(g)} - 1 \right) \quad (0.9)$$

kde parametry $T(g)$ a $P(g)$ jsou funkcemi vodivosti.

Tato varianta je nejvíce používána a nejvíce ověřena. Několik autorů tento black-box model úspěšně aplikovali, s další předpoklady definování analytické rovnice pro funkce $P(g)$ a $T(g)$.

$$T(g) = Ag^\alpha \quad (0.10)$$

$$P(g) = Bg^\beta \quad (0.11)$$

Tyto dvě rovnice mocninného tvaru jsou nejčastěji používány, kde A , B , α , β parametry aproximované funkce. Výsledky nepřesnosti dané nedokonalým proložením jsou menší než vybraní základní aproximované rovnice.

Není ale pravidlem, že by rovnice (0.10) a (0.11) měly být v každém případě použity. Jak bude dále uvedeno, byl užit i jiný druh aproximační funkce.

Parametry jsou určeny pomocí Amsinck metody [14], metodou bodů se stejnou vodivostí. Pro výpočet mohou být použity buď záznamy z prohoření (selhání vypínače) nebo ze dvou vypnutí při různých proudech.

Pro řadu stejných vodivostí získáme další potřebné veličiny i_1 , i_2 , dg_1/dt , dg_2/dt pro určení parametrů P a T .

Určení parametrů P a T vyjdeme z rovnice (0.9), kterou postupně upravíme do tvaru [3]:

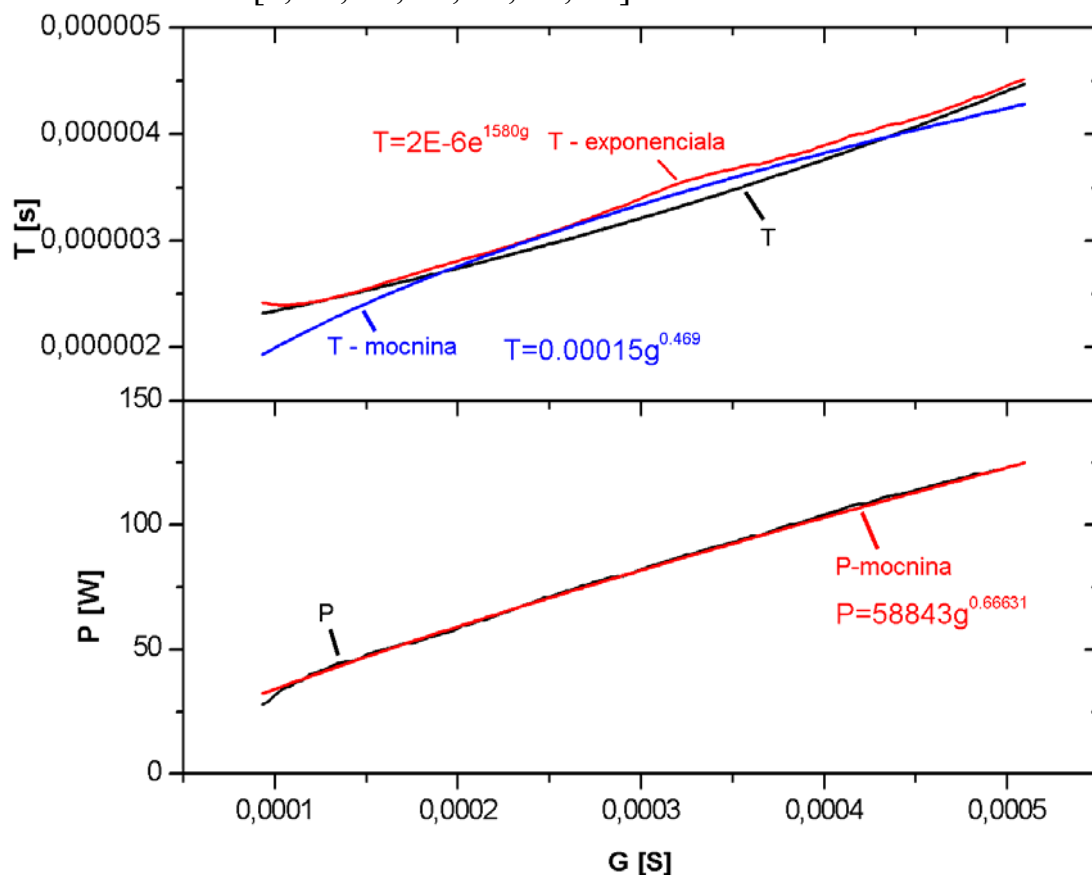
$$P = \frac{g'_1 \cdot i_2^2 - g'_2 \cdot i_1^2}{g(g'_1 - g'_2)} \quad (0.12)$$

$$T = \frac{g(i_1^2 - i_2^2)}{g'_1 \cdot g_2 - g'_2 \cdot g_1} \quad (0.13)$$

Oběma těmito parametrům, bylo nutné najít nejvhodnější funkci tak, aby pak získaný výpočet průběhu napětí i proudu, co nejvíce korespondoval s naměřenými průběhy. Výběr funkcí je poměrně široký. Je možné uvažovat o mocninných, exponenciálních a logaritmických funkcích s tím, že je důležité kontrolovat počet

iteračních kroků a porovnávat jednotlivé nové průběhy funkcí získané iterací s původním průběhem.

Na Obr. 13 jsou průběhy funkcí získané iterací, které jsou nejvíce vhodné pro BB model. Pro průběh parametru P to je funkce $P=58843g^{0,66631}$ [W] a pro parametr T to je funkce $T=2E-6 e^{1580g}$ [s]. Obecně jsem se v literatuře pro black-box modely nejvíce setkal s funkcemi mocninné typu $P=Ag^\alpha$ a $T=Bg^\beta$. Kde A , B , α , β parametry aproximované funkce [3, 14, 15, 16, 19, 20, 23].



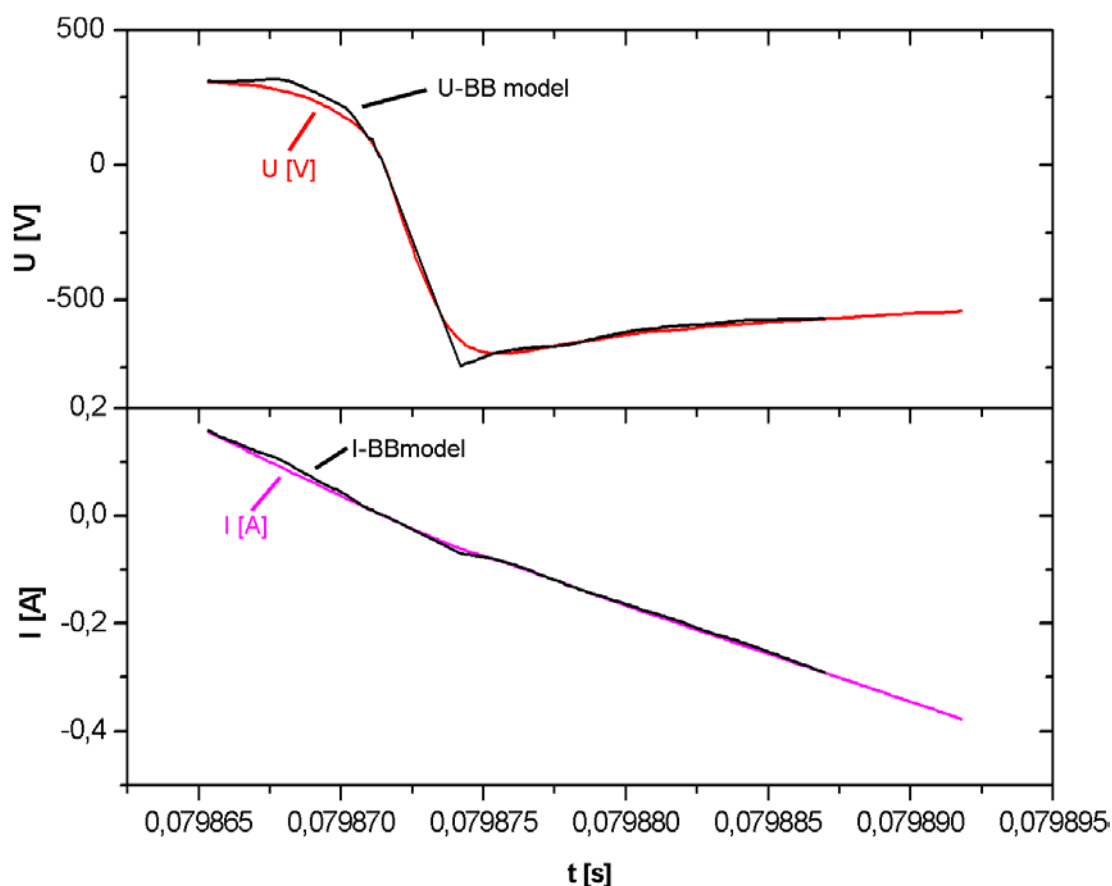
Obr. 13: Průběh parametrů P a T v závislosti na vodivosti a jejich funkce

10 Porovnání reálných pokusů s black-box modelem

Na základě vypočítaných parametrů P , T a použití black-box modelu je možné namodelovat průběhy napětí a proudu.

Jde o poslední krok při používání BB modelů. V prvních krocích byly postupně provedeny tyto kroky: změření průběhů napětí a proudu, odečtení kapacitního proudu, určení parametrů modifikované Mayrovi rovnice (A , B , α , β).

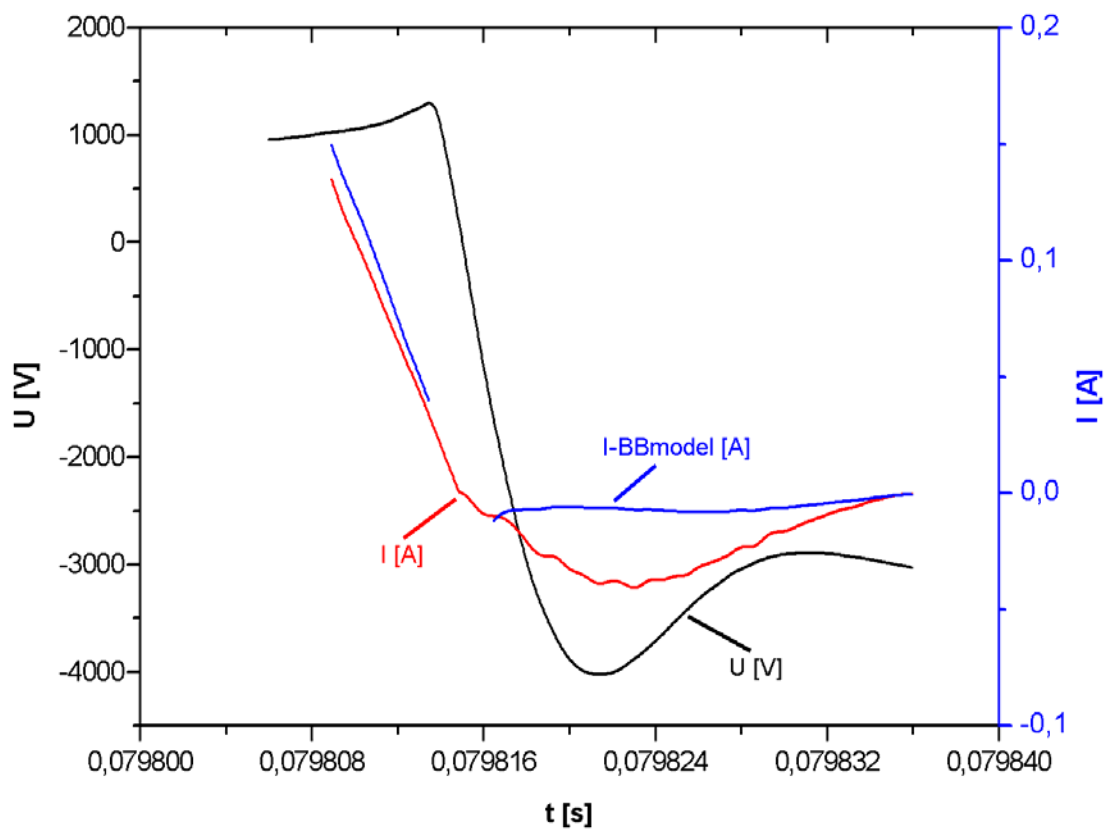
Na následujícím obrázku Obr. 14 je porovnání průběhu z black-modelu a skutečných průběhů. V obou případech jde o stejný pokus s tím, že jsou průběhy napětí a proudu zvlášť.



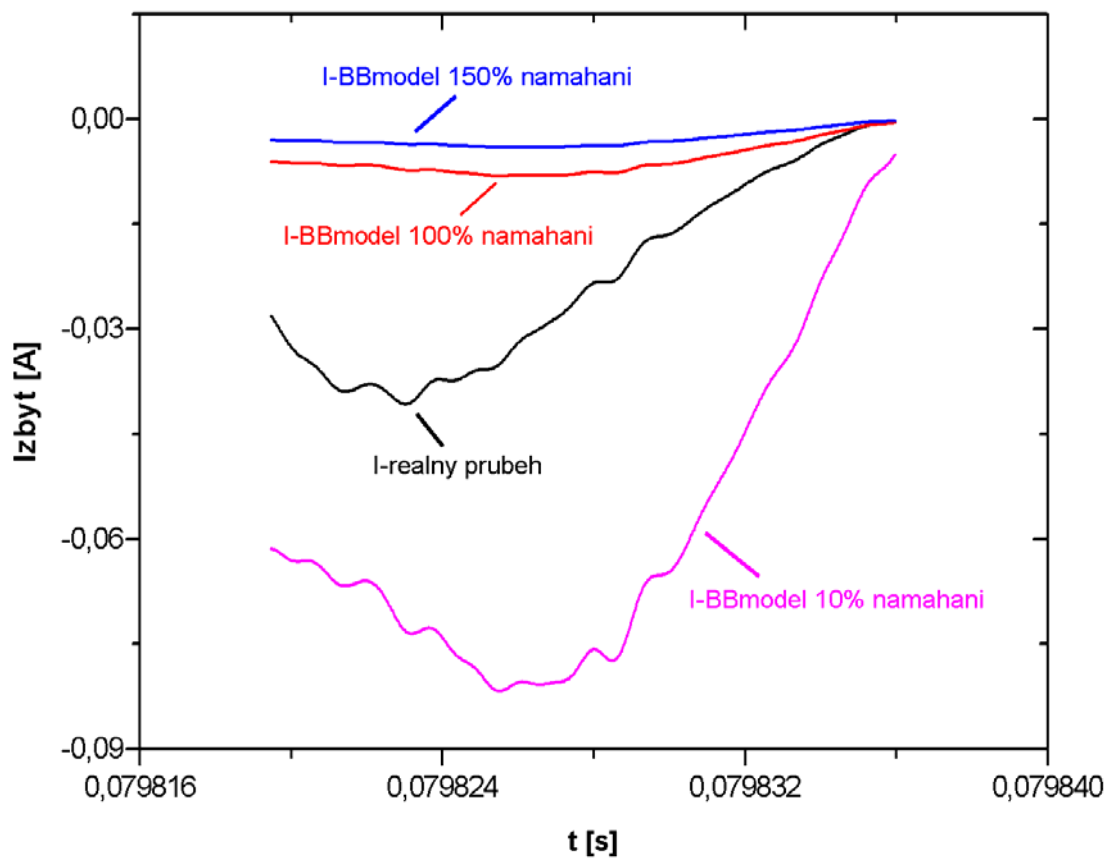
Obr. 14: Porovnání průběhů napětí a proudu s vypočítaným průběhy z BB modelu

Do tohoto okamžiku se black-box jeví jak aplikovatelný na dané podmínky s daným spínačem. Avšak další použití black-box modelu, tj. modelování s různými hodnotami napětí a proudu, tedy i s rozdílným namáháním a s výstupem, kdy by bylo možné sdělit limitní křivky spínače (vypínací mez vypínače), stále nebylo možné provést.

Paradoxem celého modelu bylo to, že se choval naprosto obráceně, na rozdíl od různých publikací na toto téma [14, 15, 18, 23], kde autoři presentovali své vypínací meze tak, že s rostoucím namáháním dochází k selhání spínače. V případě black-box modelu v této práci tomu bylo právě naopak Obr. 15 a Obr. 16. Tato skutečnost vedla k podrobnějšímu prozkoumání reálných strmostí proudu a napětí během skutečných experimentů. Výsledek, který vysvětluje vzniklou situaci, je prezentován na konci kapitoly 7. Všichni dosavadní autoři aplikovali black-box model vypínače s cizí zhášecí energií. V této práci je black-box model aplikován na spínač s SF₆ s vlastní zhášecí energií. Jak ale ukazují reálné pokusy a z nich vyhodnocené strmosti proudu a napětí Obr. 11, tak se zkoumaný spínač chová takřka obráceně. U spínače s vlastní zhášecí energií roste jeho vypínací mez spolu s rostoucími hodnotami napětí a proudu. To pak vysvětluje chování black-boxu. Bohužel tento závěr pak zastavuje další použití black-box modelu na daný spínač. Stanovení limitních křivek v tomto případě je nedostupné. A aplikace black-box modelů na spínače s vlastní zhášecí energií není vhodná.



Obr. 15: Porovnání reálného proudu a proudu z BB modelu



Obr. 16: Porovnání zbytkových proudů s odlišným namáháním

11 Závěr

Disertační práce měla několik cílů. Část z nich se podařilo v podstatě splnit. Bohužel některé z nich nemohly být z technických důvodů splněny v předpokládaném rozsahu.

Stanovené cíle a stav jejich splnění:

- Ověřit aplikovatelnost přímého měření proudu a napětí v okolí nuly proudu při zhášení elektrického oblouku v modelu spínače s SF₆.

S úspěchem byla prověřena metoda přímého měření proudu v okolí nuly proudu. Propojení bezindukčního bočnicku a osciloskopu Tektronix TDS 754C se ukázalo jako velmi kvalitní spojení. Bočník naprosto spolehlivě podával údaje jak ze silové části, kdy hodnota proudu přesahovala 1 kA, tak i z intervalu v okolí nuly proudu, kdy hodnoty proudu byly desetiny ampérů. Osciloskop Tektronix se ukázal jako velmi mocný nástroj pro měření rychlých dějů. Bylo s ním provedeno měření v délce trvání 30 μs s velikostí 1,6 GS, a to právě v okolí nuly proudu viz Obr. 8. S takovýmto časovým rozkladem tohoto děje se nemůže pochlubit žádná pracovní skupina. Pokud se tak již stalo, během tvorby této práce nebyly informace o tak přesných záznamech proudu a napětí k dispozici.

- Provést sérii experimentů s následným zpracováním naměřených dat a jejich vyhodnocení.

Provedení experimentů, při kterých byly zaznamenány údaje z okolí nuly proudu, předcházelo dosti velké množství pokusů. To vyžaduje poměrně velké časové nasazení celé skupiny lidí, kteří operují při pokusech. Přesné načasování posloupnosti uvadlostí při experimentu si vyžádalo téměř rok práce v Laboratoři spínacího oblouku na Kraví hoře. Jistý problém vznikl zrušením zmíněné Laboratoře a jejím stěhováním a znovu budováním na novém místě. S koncem laboratoře skončily i další experimenty v době, kdy bylo uskutečněno necelých 20 pokusů s daty v okolí nuly proudu. Tento stav negativně ovlivnil další možnost experimentů. Je nutné podotknout, že opakování pokusů a provedení dalších s rozdílnými parametry nastavení, by bylo patřičným přínosem pro tuto práci.

Vyhodnocování dat z experimentů, podléhalo další časové náročnosti. Data musela být zpracována ze všech třech měřících nástrojů (osciloskop Gould, měřící karta ATMIO Obr. 7 a osciloskop Tektronix Obr. 8). Největší problém byl s údaji z Tektronixu, který snímal data v okolí nuly. Data musela být vhodně upravena pro další diagnostiku, ve které bylo nutné pracovat s vyhlazeným signálem a časovými derivacemi. Protože neexistují žádné popsané postupy ani určení vhodné metody na vyhlazení signálu, vyžádal si tento úkol značný čas, než se podařilo najít tu nejideálnější metodu. Byla otestována celá řada způsobů vyhlazování (zředovací průměr, plovoucí průměr, vážený průměr) a přitom byl sledován vliv použitého stupně použitého polynomu, vliv počtu použitých bodů pro výpočet koeficientů polynomu, počet po sobě jdoucích operací vyhlazení, počet bodů ze kterých byl počítán průměr. Nakonec se jako nejvhodnější pro vyhlazení dat ukázala metoda FFT-smoothing.

- Určit velikost a časový průběh zbytkového proudu.

Z upravených dat byla vyhodnocena velikost a průběh zbytkového proudu Obr. 9. Tomuto určení předcházelo stanovení parazitní kapacity a kapacitního proudu. Odečtením vypočítaného kapacitního proudu od naměřeného byl určen zbytkový proud.

Velmi podstatným zjištěním během této práce je charakteristika vypínací schopnosti spínače s vlastní zhášecí energií. To dokumentuje obrázek Obr. 11, z něhož je patrné jak a při jakém namáhání vypínač vypne či selže. A také to, že s rostoucím namáháním se jeho vypínací schopnost zvětšuje. Na rozdíl od většiny ostatních typů spínačů (s cizí zhášecí energií, s více tlakovými zhášecími komorami), kde je tomu naopak, s rostoucím namáháním se zvětšuje pravděpodobnost selhání vypínače. Tento fenomén u vypínačů s vlastní zhášení energií je velmi významný a podstatný.

- Vybrat vhodný typ fyzikálně matematického modelu elektrického oblouku typu black-box.

Na základě publikací, zejména publikace [14], vznikla realizace black-box modelu. Model vychází z Mayrovy rovnice (0.7), kterou použila a různě modifikovala celá řada badatelů v této oblasti. S tím, že jako nejvíce užívaný model je ten, kde parametry rovnice (0.9) P a T jsou funkcemi vodivosti nebo proudu. I v případě této práce byly parametry P a T zvoleny funkcemi vodivosti. Pro definici analytické funkce se velmi často volí mocninné funkce typu $P=Ag^\alpha$ a $T=Bg^\beta$, které byly taktéž využity, ale pouze pro popis závislosti $P(g)$ Obr. 13 a pro parametr $T(g)$ byla vybrána exponenciální funkce typu $T=Ae^{Bg}$, která lépe popisuje průběh parametru T viz Obr. 13.

- S využitím experimentálně získaných dat ověřit možnost modelování vypínacího procesu.

Aplikace black-box modelu na model spínače se v první fázi jevila jako úspěšná, což dokumentuje Obr. 14. Zde jsou zvlášť vykresleny průběhy proudu a napětí spolu s průběhy vypočítanými black-box modelem. Z obrázků je patrné, jak vypočítané průběhy kopírují skutečná naměřená data. Avšak v momentě, kdy pomocí modelu měly být modelovány různé stavy namáhání vypínače, se black-box model choval naprosto opačně Obr. 15 a Obr. 16. Jde o to, že black-box model vznikl na základě dat z prohoření, kde strmosti napětí a proudu dosahují menších hodnot, než v případě úspěšného vypnutí. Jakmile byl black-box model použit na data s vypnutím vypínače a bylo zvětšováno jeho namáhání, tak se black-box „lépe“ vypínal. To koresponduje s předchozím závěrem z reálných experimentů. Tím však další aplikace black-boxu končí, i bez stanovení limitních křivek, protože jejich stanovení je nemožné. Dá se říci, že použití black-box modelu na spínače typu s vlastní zhášecí energií není vhodné.

- Srovnat teoretické a experimentální výsledky.

I když black-box model nebyl stoprocentně využit, tak by se z jednotlivých závěrů dalo usoudit, že teoretické, experimentální i částečné výsledky z black-box modelů spolu souhlasí.

Předložená práce představuje výsledky v podstatě šestiletého pracovního úsilí. Započala již návrhem a konstrukcí zhášecí komory modelu v diplomové práci [5], a pokračovala dál až po následné experimentální ověření aplikací dosud nepropracovaných metod, kterými se zabývá tato studie.

Rád bych v této souvislosti poděkoval všem pracovníkům, kteří mi svou pomocí a radou pomohli v její realizaci, a to nejen pracovníkům FEKT VUT, ale také pracovníkům Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a Zkratovnictví Běchovice a. s.

12 Použitá literatura

- [1] Gross B., Havelka O., *Elektrické přístroje II*, první vydání, Brno, Rektorát vysokého učení v Brně, 1978, 273 stran, VUT Brno, ISBN 55-583-78
- [2] Bárta K., Vostracký Z. a kolektiv, *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*, první vydání, Praha, SNTL, 1983, 448 stran, ISBN 04-525-83
- [3] Vostracký Z., *Kandidátská disertační práce*, Úvod do výpočetní metodiky zhášecích komor tlakovzdušných vypínačů vvn, VVZ – ETD – Škoda o.p. 1975
- [4] Havelka O. a kol., *Elektrické přístroje*, první vydání, Praha, SNTL, 1985, 440 stran, ISBN 04-529-85
- [5] Samek R., Smékal R., *Diplomová práce*, Návrh a ověření vlastností spínacího přístroje s SF₆, VUT FEI, Brno, 1999
- [6] Samek R., Měření zbytkového proudu, *Semestrální projekt II*, VUT FEI Brno, 1998
- [7] Samek R., Návrh konstrukční úpravy polotovaru zhášecí komory experimentálního modelu pro výzkum vlastností elektrického oblouku hořícího v SF₆, *Semestrální projekt I*, VUT FEI Brno, 1997
- [8] Smékal R., Návrh konstrukční úpravy podvozku máloolejového vypínače HL 4/7 s pružinovým střádačovým pohonem BLRM pro aplikaci na experimentální model spínače s SF₆, *Semestrální projekt I*, VUT FEI Brno, 1997
- [9] Gregor J., et al., Zero current measurements using the Rogowski coil, *IIX international conference Switching Arc Phenomena*, Lodz, Poland 1997, Vol. 1, p. 268 – 270, ISBN 83-87198-20-X
- [10] Damstra G. C., Kertesz V., Development and application of a 10MHz digital system for current-zero measurements, *IEE Proc.-Sci. Means. Technol.* Vol 142, No. 2, March 1995, p. 125-132
- [11] Pohanke Z., The current measurement device for synthetic test circuit, *XII Symposium on electrical discharges in gases*, Warsaw, Poland, 1991, p. 268-270
- [12] Samek R., Vávra Z., Measurement post-arc current in the model circuit breaker, *Sborník prací studentů a doktorandů*, Vol. VI (2000), Brno 2000, pp. 491–493, ISBN 80-7204-155-X,
- [13] Vávra Z., Aubrecht V., Samek S., Trávníček R., Gregor J., Jakobová I., Study of Switching Arc in the Vicinity of Current Zero, *III International Conference: Plasma Physics and Plasma Technology*, PPPT-3, Minsk, Belarus, September 2000

- [14] CIGRE WG 13.01, Applications of Black Box Modelling to Circuit Breakers, *ELECTRA*, No. 149, August 1993, pp 41-71
- [15] St-Jean G., Landry M., Leclerc M., Chénier A., A new concept in post-arc analysis applied to power circuit-breakers, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Volume 3, No. 3, July 1988, pp 1036-1043
- [16] Guilloux C., Therme Y., Scarpa P. G., Measurement of the post arc current of HV circuit breakers application to short circuit tests with ITRV, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp 1148-1152
- [17] Janowski T., Jaroszyński L., Stryczewska D., Modification of the Mayr's Electric for gliding arc analysis, <http://vol.pol.lublin.pl>
- [18] Blez B., Guilloux C., Post-arc current in high voltage SF₆ circuit-breakers when breaking a up to 63 kA, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp 1056-1062
- [19] Wild W., Kichesch P., Ryli W., Use of integral arc models in circuit breaker testing and development, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp 1685-1691
- [20] Klejch J., New concept of the evaluation of black-box arc parameters P and τ , *XIIIth symposium on physics of switching arc*, Vol.1, TU of Brno, October 1996, pp 63-66
- [21] Smeets R., Sluis L. van der, Even A., Scarpa P., Kertézs V., Habendank U., Neumann C., Progress towards “digital”, a novel additional tool to investigate the performance of HV circuit breakers for the benefit of utility, manufacturer and standardizing body, *CIGRE*, Session 1998, 13-107, pp 1-6
- [22] Furnica E., Baraboi A., Lonte P., Modelisation of the electric arc a short review of types and applications, *Eighth International Conference Switching Arc Phenomena*, 1997, Lodz, pp 34-37, ISBN 83-87198-20-X
- [23] Tanabe T., Ibuki K., Sakuma S., Computer Aires study of current zero behaviour of SF₆ arcs, *Conference on Gas Discharges and their Applications*, 1985, pp 65-68
- [24] Baraboi A., Adam M., Pancu C., Baraboi T. A., A new approach on the combined Cassie-Mayr conductance type electric arc model, *Ninth International Conference of Switching Arc Phenomena*, 2001, Lodz, pp 174-178
- [25] Gleizes A., Rahal A. M., Delacroix H., Van Doan P., Study of circuit-breaker arc with self-generated flow: part I – energy transfer in the high-current phase, *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 16, No. 6, December 1988, pp 606-614
- [26] Gleizes A., Rahal A. M., Papadopoulos S., Vacquie S., Study of circuit-breaker arc with self-generated flow: part II – the flow phase, *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 16, No. 6, December 1988, pp 615-621
- [27] Gleizes A., Mitiche M, Van Doan P., Study of circuit-breaker arc with self-generated flow: part III – the post-arc phase, *IEEE Transaction on Plasma Science*, Vol. 19, No. 1, February 1991, pp 12-18

13 Abstract

In the Ph.D. thesis are presented the results of an experimental theoretical investigation of the switching arc in the vicinity of the current zero in quenching device model of self-blast SF₆. Here are pointed out possibilities of the utilization of modern measuring techniques and diagnostic methods in the study of this problem.

Under the conditions of the Switching Arc Laboratory of UVEE FEKT VUT has been verified a direct a method for measurements in the vicinity of the current zero on the model of a switch with SF₆ with its own quenching energy. The current source was a vibrating RLC circuit with an overall capacity of 3.45mF at a charging voltage 6.4kV. The measurement of the current was implemented by an induction-less shunt with a resistance of 18mΩ through the mediation of the digital oscilloscope Tektronix TDS 754C with a sampling rate of 200MS per channel. Furthermore have been scanned with the oscilloscope the arc voltage waveforms (voltage probe Tektronix P 6015A). Through the mediation of the measuring card AT MIO 16 F5 have been scanned all the electrical and non-electrical quantities during the experiment.

The measured data in vicinity of the current zero – residual current and arc voltage – transient recovered voltage have been processed by the special mathematical programme Microcal Origin 5.0 and subsequently evaluated in accordance with the known method. Then the post-arc current could be identified.

In second part of this thesis is concerned black-box (BB) arc model. The aim of black-box arc model is to describe interaction of switching arc and the corresponding electrical circuit during in interruption process. A basic description of arc behaviour by black-box models was formulated in publications of Cassie and Mayr. Black-box arc models are mathematically expressed as formulae for the time varying arc conductance as a function of arc current, arc voltage and several constant or time varying parameters, representing arc properties. The BB models are represent rather as mathematical model then physical model. And therefore the electric behaviour is of importance rather than internal physical processes.

The Mayr's equation are used for simulation electric behaviour in vicinity of the current zero.

14 Curriculum vitae

- Roman Samek narozen 1975 ve Svitavách, ČR
- Vzdělání 1994-2002 VUT FEKT Brno, Ph.D. student
1994–1999 VUT FEI Brno Silnoproudá elektrotechnika
a elektroenergetika
1992–1994 Střední odborné učiliště železniční, Česká Třebová,
Maturitní studium: Elektrotechnika – výroba a provoz strojů
a zařízení
1989–1992 SOUŽ, Česka Třebová Elektromechanik se
zaměřením pro stroje a zařízení
- Ocenění Cena děkana FEI VUT za vynikající teoretické a praktické
znalosti, které prokázal při vypracování diplomové práce a její
obhajobě
- Pracovní zkušenosti 2003 OEZ Letohrad
2000-2001 IVEP — CAD/CAE konstruktér, práce na
odpínačích, odpojovačích a usečnicích
1999-2000 MCAE systém — CAE konstruktér
1996-1999 UVEE FEE VUT — studentská vědecká síla
- Pedagogická činnost výuka v předmětech Elektrické přístroje, Měření
v silnoproudé elektrotechnice, Základy elektrotechniky
- Aktivní účast na konferencích
- Celostátní konference–elektrické pohony a výkonová elektronika EPVE 2000, Brno
 - 4th Czech-Russian Seminar “Electrophysical and Thermophysical Processes in Low-Temperature Plasma”, Brno, Czech Republic, October 2000
 - XIVth Symposium on Physics of Switching Arc, Nove Mesto na Morave, Czech Republic, September 2001
 - Ninth International Conference of Switching Arc Phenomena, Lodz, Poland, September 2001
- Spolupráce na grantech
- Dynamické jevy, interakce elektrického oblouku s obklopujícím prostředím
 - Rozvoj metod vyšetřování interakce elektrického oblouku s obklopujícím prostředím
 - Rozvoj tvůrčího potenciálu studentů, učitelů a inženýrů pomocí metodiky TRIZ
 - Studium a výuka metody TRIZ s podporou Internetu