

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

Ing. Petr Budiš

STUDIUM PROUDU PLYNU VE ZHÁŠEDLE VYPÍNAČE VN
STUDY OF GAS CONVECTION IN HIGH VOLTAGE SWITCH

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. Ing. Zdenek Vávra, CSc.

Oponenti: Prof. RNDr. Vratislav Kapička, DrSc.
Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc.

Datum obhajoby: 3. 3. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

vypínač vysokého napětí, tryska, simulace, proudění, tlak

KEY WORDS

high voltage switch, nozzle, simulation, convection, pressure

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT v Brně

Tato práce vznikla v rámci řešení projektu
GA ČR 102/04/2090

© 2004 Petr Budiš
ISBN 80-214-2658-6
ISSN 1213-4198

Obsah

OBSAH	3
1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	5
2 POPIS ŘEŠENÍ	7
3 PRVNÍ ETAPA VÝPOČTU	8
3.1 Matematicko fyzikální model první etapy výpočtu.....	8
3.2 Závěry z první etapy výpočtu.....	12
4 DRUHÁ ETAPA VÝPOČTU	13
4.1 Matematicko fyzikální model druhé etapy výpočtu.....	13
5 ZÁVĚRY Z VÝPOČTU TLAKU V AKUMULAČNÍM PROSTORU.....	17
6 VÝPOČET CHARAKTERISTIKY PROUDĚNÍ V TRYSCE.....	18
7 ZÁVĚR.....	25
8 LITERATURA.....	27
9 CURRICULUM VITAE	28
ABSTRAKT.....	28
ABSTRACT	28

Použité symboly a zkratky

a	rychlost zvuku	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
c	rychlost proudění	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_P	měrné teplo při stálém tlaku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
c_V	měrné teplo při stálém objemu	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
e_A	vnitřní energie	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
F	průřez	$[\text{m}^{-2}]$
G	hmotnostní tok	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
i	entalpie plynu	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}]$
I	proud	$[\text{A}]$
k	Poissonova konstanta	$[-]$
M	Machovo číslo	$[-]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
P	výkon	$[\text{W}]$
r	poloměr	$[\text{m}]$
\bar{R}	plynová konstanta	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
ρ	hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
t	čas	$[\text{s}]$
T	teplota	$[\text{K}]$
U	elektrické napětí	$[\text{V}]$
V	objem	$[\text{m}^3]$
u, v, w	složky rychlosti	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
x, y, z	souřadnice	$[-]$
X, Y, Z	složky jednotkové síly	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Cílem této práce je vytvoření matematického modelu, který napomůže získání obrazu průběhu vybraných fyzikálních veličin ve vysokonapěťovém vypínači. Zhášecí systémy vypínačů, které využívají energie vypínaného obvodu pro vytvoření tlakových podmínek vhodných k uhasnutí oblouku jsou citlivé na počáteční stav a na vnitřní geometrické uspořádání systému. Důležitou podmínkou správné funkce je vytvoření oblasti s dostatečnou intenzitou proudění v okolí kontaktů vypínače.

V současném stavu řešení se zpravidla ověřují výpočtem charakteristiky navrhovaného řešení. Nejedná se tedy o návrh optimalizované varianty řešení, ale o ověření vhodnosti jednotlivých variant geometrického uspořádání vypínače, vhodnosti různých druhů zhášecího média a vhodného načasování průběhu vypínání. K řešení tohoto problému je možné zvolit několik cest.

Jednou z nich je numerické modelování proudění v komoře vypínače v průběhu zhášení elektrického oblouku pomocí programových balíčků Fluent (Rampant). Tato metoda je v současné době užívána na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky FEI VUT v Brně ve spolupráci s Leteckým ústavem FSI VUT v Brně [3]. Přínosem metody jsou relativně nízké náklady na posouzení různých variant bez nutnosti výroby modelů a získání přehledu o podmínkách proudění v komoře vypínače v různých místech a v průběhu času. Cílem řešení bylo zahrnout pokud možno co největší počet reálných fyzikálních jevů, které mají zásadní vliv na charakter proudění. Nevýhodou je především značná časová a hardwarová náročnost výpočtů. I na velice výkonných strojích, které jsou k výpočtu využívány se jedná řádově o několik desítek až stovek hodin výpočtu. Dle kvalifikovaných odhadů se chyba metody pohybuje řádově někde mezi 7 a 10 procenty, což pro požadovaný účel plně dostačuje. Do budoucna se předpokládá rozšíření modelu o vlastní elektrický oblouk, což si však vyžádá zásadnější zásah do softwarového vybavení a následně zpřesnění výpočtu. Daní za toto vylepšení bude opětovné zpomalení výpočtu, které však bude pravděpodobně kompenzováno zrychlením výpočetní techniky. V delším časovém horizontu lze od tohoto přístupu k řešení očekávat minimálně částečnou automatizaci návrhu optimálních technických parametrů VN vypínače pro zadané vstupní hodnoty.

Druhou metodou řešení tohoto problému je určení příslušných fyzikálních veličin VN vypínače je výpočet těchto veličin z termodynamických rovnic. Toto řešení nebude zcela jistě dosahovat takové přesnosti, jako výše uvedená metoda. Navíc na jednotlivé části VN vypínače hledí jako na celek, nikoliv v jednotlivých bodech. Nespornou výhodou této metody by však měl být především velice krátký čas nutný k výpočtu při přijatelné přesnosti. Chyba by se dle kvalifikovaného odhadu mohla pohybovat kolem 20 procent. Tato hodnota by měla být dostatečná pro první přiblížení a následně by bylo možné po předoptimalizaci řešení použít metodu přesnější, avšak časově náročnější. Popsané řešení je předmětem mé práce.

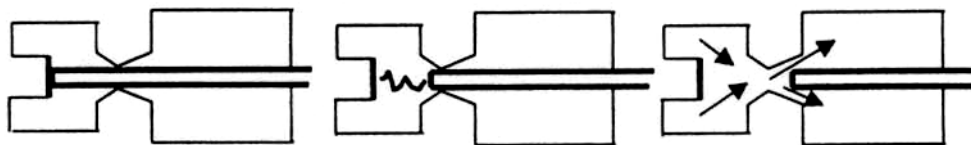
Problematikou se podobným způsobem zabýval i G.A.Cividjian [2]. Výsledky jeho práce se však prozatím nepodařilo hodnověrně prokázat a ověřit. Jeho řešení vycházelo pouze ze základních rovnic a nebralo v úvahu některé podstatné aspekty, především pohyb kontaktu a vstupní energii oblouku, což jsou veličiny výrazně ovlivňující výpočet. Navíc se jeho postup zabývá z mého pohledu až závěrečnou fází výpočtu, tedy prouděním v trysce na základě získaných hodnot tlaků v akumulacním i expanzním prostoru vypínače.

Předmětem postupu výpočtu, který je navržen v této práci je především určení tlakových poměrů v komorách vypínače a rychlost proudění zhášecího média tryskou. Tyto veličiny zásadním způsobem ovlivňují uhasnutí oblouku. Na sledované tlakové veličiny je pohlíženo jako na časově proměnné veličiny jejichž rozložení je v rámci jedné komory konstantní. Průběh veličin je zachycen do grafu.

Výstupem mé práce je softwarový program, respektive šablona v prostředí Microsoft Excel, která umožní uživatelsky přívětivý přístup a výpočet na běžném PC.

2 POPIS ŘEŠENÍ

Pól uvažovaného vypínače je rozdělena na dvě části, akumulční a expanzní prostor. Prostory odděluje tryska uzavřená na počátku tělesem roubíku, viz (obr.1). V okamžiku, kdy se má rozpojit elektrický obvod se začne roubík vysouvat směrem k expanznímu prostoru. V akumulčním prostoru se elektrickým obloukem hořícím mezi opalovacím kroužkem a roubíkem ohřívá zhášecí médium a v důsledku toho roste tlak. Pro jednoduchost budeme předpokládat, že má oblouk tvar válce a zhášecímu médiu předává z délkového elementu část tepelné energie závislou pouze na elektrických parametrech oblouku. Tento interval bude označen indexy 0-1. Tlak narůstá až do okamžiku, než roubík uvolní prostor trysky. V tomto bodě je ve výpočtu věnována pozornost změnám geometrie trysky při průchodu roubíku. V okamžiku, kdy čelo roubíku opouští hrdlo trysky se rozbíhá proudění z oblasti vyššího tlaku v akumulčním prostoru do oblasti nižšího tlaku v expanzním prostoru. Intenzivní proudění v hrdle trysky významně napomáhá uhasnutí elektrického oblouku a účinnému chlazení částí vypínače. Tlak v akumulčním prostoru je před uhasnutím oblouku trvale posilován přenosem tepla z oblouku do prostoru. Naopak proti tlakovému gradientu působí část oblouku, která hoří v expanzním prostoru a také fakt, že expanzní prostor je uzavřený. Tento interval je ve výpočtu značen indexy 1-2.



Obr. 1

Cílem výpočtu je především určení tlakových poměrů uvnitř VN vypínače a určení Machova čísla v trysce. K matematickému popisu jsou použity následující výchozí vztahy:

- Stavová rovnice plynu
- Rovnice kontinuity
- Rovnice zachování hybnosti
- Rovnice zachování energie

3 PRVNÍ ETAPA VÝPOČTU

3.1 MATEMATICKO FYZIKÁLNÍ MODEL PRVNÍ ETAPY VÝPOČTU

Praktická realizace výpočtu je založena především na teoretických podkladech zpracovaných v teoretickém úvodu práce. Výpočet je založen na několika zjednodušujících předpokladech. V okamžiku oddálení kontaktů dochází k zapálení elektrického oblouku. Energie oblouku je dána téměř výhradně elektrickými parametry obvodu. Výpočet je prováděn v jednotlivých bodech a poté proložen křivkou. Za hledané fyzikální veličiny v této fázi výpočtu považujeme především tlak a tlakový gradient v akumulacním prostoru, dále pak teplotu v akumulacním prostoru a s tím spojené další veličiny, a to zejména na konci první etapy, tedy v době, kdy se otvírá tryska. Ve výpočtu se vychází z dvouzónového modelu. To znamená že odlišujeme pouze zónu oblouku a dále okolí oblouku. V obou oblastech separátně považujeme v rámci zjednodušení podmínky za homogenní.

Oblouk v první etapě výpočtu chápeme jako jediný a stabilní zdroj energie v akumulacním prostoru. Zdrojem tepelné energie, která charakterizuje nárůst tlaku v uzavřeném prostoru je Jouleovo teplo. V rámci dalších zjednodušení zanedbáváme i změny charakteristiky oblouku v přielektrodoých oblastech.

Pro jednotlivé zóny je ve výpočtu třeba brát v úvahu teplotní závislosti některých termodynamických veličin. Pro analýzu elektrického oblouku a jeho okolí je nutné znát teplotní závislosti těchto veličin v širokém rozmezí teplot a tlaků. Pro výpočet v jednotlivých bodech byly použity především tabulkové hodnoty z literatury [7]. Nárůst tlaku v akumulacním prostoru vychází z termodynamických rovnic uvedených v teoretickém úvodu mé práce.

Ze zákona zachování energie platí, že energie přivedená za určitý čas do uzavřeného akumulacního prostoru je rovna nárůstu energie v tomto prostoru za stejný čas. Pod přivedenou energií rozumíme energii oblouku sniženou o ztráty. Tato energie se zcela transformuje ve vnitřní energii akumulovanou v akumulacním prostoru, protože systém v první fázi výpočtu (roubík zcela uzavírá trysku) nekoná práci. Můžeme tedy psát

$$U_{obl} I \cdot \Delta t - P_{ztrat} \cdot \Delta t = \rho_A \cdot V_A \cdot \Delta e_A \quad /3-1/$$

kde Δe_A označuje nárůst vnitřní energie vázané na hmotnost. Proto ji lze vyjádřit v měrných veličinách

$$\Delta e_A = c_V \cdot \Delta T \quad /3-2/$$

kde c_V je měrné teplo při stálém objemu.

Ztráty uvedené na levé straně úvodní rovnice se zpravidla uvádějí v literatuře jako podíl z energie oblouku. Pravdou je, že byly činěny pokusy o přesné vyčíslení ztrát pomocí exaktních postupů, přesnost výsledků je však minimálně problematická. Po úpravě levé strany rovnice zavedením koeficientu ztrát a pravé stranu dle vztahu /3-2/ dostáváme

$$U_{obl} \cdot I \cdot (1 - k_{ztrat}) \cdot \Delta t = \rho_A \cdot V_A \cdot c_V \cdot \Delta T_A \quad /3-3/$$

a následně dosadíme za ρ_A ze stavové rovnice plynu a protože poměr měrných tepel určuje Poissonovu konstantu

$$k = \frac{c_p}{c_V} \quad /3-4/$$

platí

$$U_{obl} \cdot I \cdot (1 - k_{ztrat}) \cdot \Delta t = p_A \cdot V_A \cdot \frac{c_p \cdot \Delta T_A}{k \cdot gRT_A} \quad /3-5/$$

Protože zanedbáváme objem vysouvajícího roubíku, respektive předpokládáme v prvním přiblížení, že jeho objem nahrazuje hořící oblouk jedná se o děj při stálém objemu, děj izochorický ve kterém platí

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad /3-6a/$$

respektive

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta T}{T} \quad /3-6b/$$

Po dosazení /3-6b/ do /3-5/ získáme rovnici s hledaným přírůstkem tlaku v akumulacním prostoru

$$U_{obl} \cdot I \cdot (1 - k_{ztrat}) \cdot \Delta t = p_A \cdot V_A \cdot \frac{c_p \cdot \Delta p_A}{k \cdot gR \cdot p_A} \cdot$$

Po úpravě získáme

$$\Delta p_A = k \cdot gR \frac{U_{obl} \cdot I \cdot (1 - k_{ztrat})}{c_p \cdot V_A} \cdot \Delta t \quad /3-7/$$

což je stěžejní vztah pro výpočet tlaku v akumulacním prostoru. Celkový tlak určený první etapou výpočtu v akumulacním prostoru poté v čase t je

$$p_{At} = p_{A(t-\Delta t)} + \Delta p_A \quad /3-8/$$

Pomocí vztahů /3-7/ a /3-8/ je možné počítat průběh tlaku v akumulacním prostoru vypínače od zapálení oblouku do otevření trysky.

Výpočet ve fázi jedna výpočtu a poté i fáze dvě byl ověřen na naměřených hodnotách z konkrétního vypínače. Byly měřeny hodnoty pohybu roubíku, obloukového napětí, proudu a samozřejmě tlaků v akumulacním a expanzním prostoru vypínače. Plnicí tlaky byly v jednotlivých pokusech různé, pohybovaly se však na úrovni 0,5 MPa.

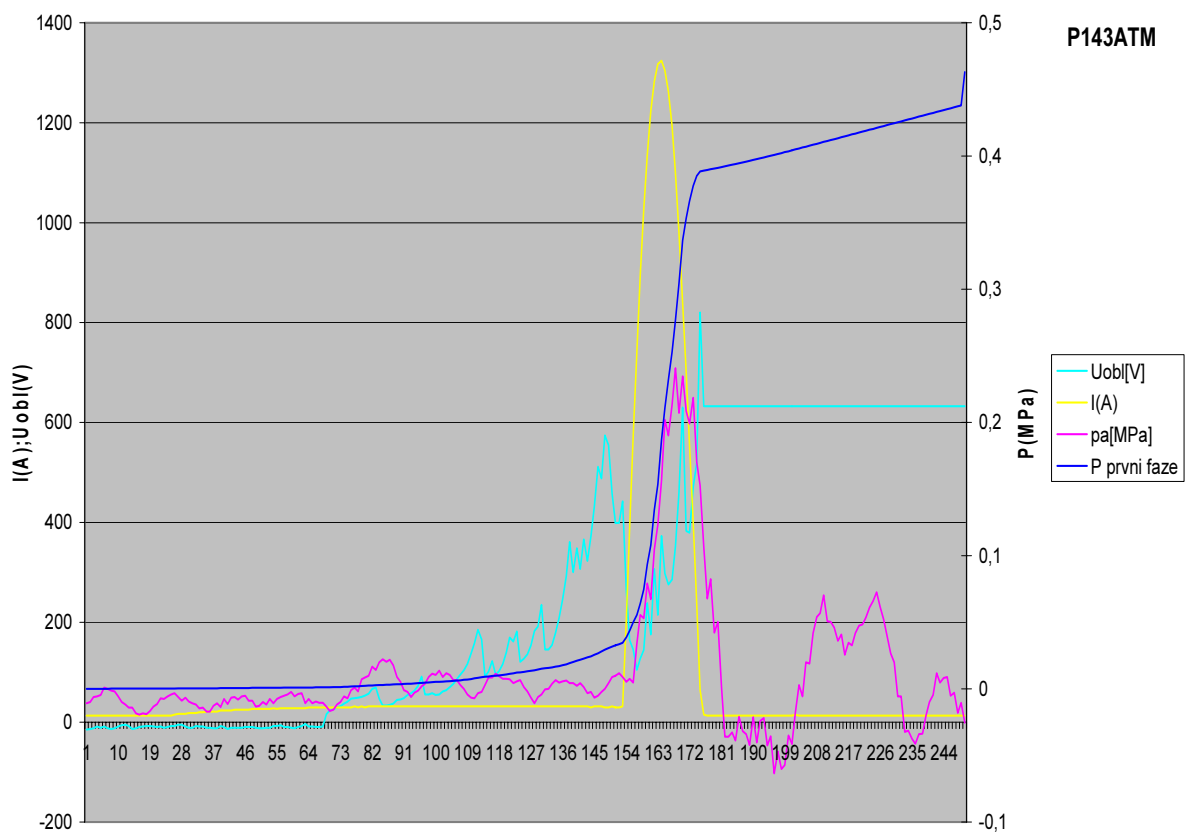
Na reálném vypínači byly provedeny měření pro jednu i dvě půlvlny. Objem akumulacního prostoru měřeného vypínače je 2,5 dm³ a objem expanzního prostoru je 4,5 dm³. Bylo provedeno 18 měření a při srovnání teoretických závěrů s naměřenými hodnotami byly využity pro co největší objektivitu výsledků všech měření.

Proto, aby bylo možné dosadit příslušnou hodnotu Possonovy konstanty k , je nutné počítat teplotu v akumulacním prostoru v každém kroku výpočtu. Teplotu v akumulacním prostoru je možné získat ze vztahu /3-6/, protože se jedná o izochorický děj. Jako počáteční počítanou teplotu předpokládejme teplotu 20°C, tedy přibližně 293K. Výsledné vypočtené hodnoty teploty v akumulacním prostoru jsou uvedeny v příloze 5 této práce. Vypočtené teploty první fáze výpočtu se pohybují v rozmezí od 400K – 700K pro všechna měření v oblasti maximálních teplot, tedy těsně před uvolněním trysky, respektive při maximálním tlaku v akumulacním prostoru. Vypočtené hodnoty teploty nebylo možné ověřit s naměřenými hodnotami, protože teplota v akumulacním ani expanzním prostoru nebyla součástí měření.

Takto vypočtené hodnoty teploty mohou mít i konkrétní praktický význam. Jde o první fázi výpočtu, tedy o stav před otevřením trysky a prouděním zhášecího média. Výpočet fáze jedna tedy popisuje stav, kdy nedošlo z jakýchkoliv důvodů k otevření trysky (mechanické selhání vypínače) a nebo k vytěsnění trysky

obloukem. Pak by teoreticky dosahovaly hodnoty tlaku a teploty v akumulacním prostoru vypínače hodnot daných výpočtem a kriticky namáhaly konstrukci vypínače.

Stěžejní pro další postup ve výpočtu jsou hodnoty tlaku v jednotlivých časových intervalech. Vypočtené hodnoty byly pro snazší srovnání počítány ve stejných intervalech jako naměřené hodnoty. Pro výpočet byly použity vztahy /3-7/ a /3-8/. Po dosažení konkrétních hodnot pro SF₆ a především hodnoty proudu a obloukového napětí byly vypočtené hodnoty srovnávány s naměřenými. Bylo dosaženo relativně dobrých výsledků, jak dokumentuje i níže uvedený graf srovnávající vypočtené a naměřené hodnoty tlaku v akumulacním prostoru vybraného pokusu. Vypočtené hodnoty nárůstu tlaku jsou zobrazeny modře, naměřené hodnoty fialovou barvou (viz. legenda ke grafům). Pro názornost jsou opět ukázány i hodnoty obloukového napětí a proudu. Kompletní sady grafů ze sledovaných měření i s hodnotami jsou uvedeny v příloze 5 disertační práce.



Graf4 z pokusu označeného jako P143ATM

3.2 ZÁVĚRY Z PRVNÍ ETAPY VÝPOČTU

Výpočet byl proveden v prostředí Microsoft Excel. Výpočty byly prováděny po krocích. To v praxi například znamená, že hodnota tlaku byla nejprve vypočtena pro dané konkrétní hodnoty stavových, teplotně závislých veličin (Poissonova konstanta, měrná tepla, atp.). Poté je dopočtena změna teploty, která při tomto kroku vznikla působením změny tlakových poměrů v akumulacním prostoru. Následně jsou upraveny hodnoty stavových veličin pro další výpočet tlaku v dalším kroku. Tento postup se opakuje až do konce sledovaného časového intervalu krok za krokem.

První etapa výpočtu ukázala použitelnost uvedené metody a postupů. Je zcela evidentní, že na jednoduchých principech lze modelovat procesy v akumulacním prostoru vypínače s relativně dobrou přesností a to minimálně do doby výraznějšího proudění tryskou vypínače.

V této fázi výpočtu nemělo smysl zabývat se konkrétní statistickou hodnotou chyby výpočtu, respektive odchylky naměřených a vypočtených hodnot. Ta by byla zkreslena jednak nepřesnostmi v měření, které nelze jednoznačně určit a také faktem, že byly k dispozici pouze hodnoty pro jeden konkrétní vypínač. Pro větší objektivitu a průkaznost výsledků by bylo nutné závěry ověřit ještě alespoň na dvou dalších vypínačích, případně minimálně na různých plnicích tlacích v testovaném vypínači.

Důležité je, že z hodnoty proudu a napětí na vypínači lze relativně přesně predikovat nárůst tlakových poměrů. Dále je zřejmé, že tlakové poměry jsou i po otevření trysky výrazně ovlivňovány energií oblouku a že v prvních okamžicích po průchodu roubíku tryskou jednoznačně převládají vlivy nárůstu tlaku způsobené uvolňovanou energií oblouku nad poklesem tlaku určeném prouděním média tryskou.

4 DRUHÁ ETAPA VÝPOČTU

4.1 MATEMATICKO FYZIKÁLNÍ MODEL DRUHÉ ETAPY VÝPOČTU

Druhá etapa výpočtu je založena na obdobných principech jako etapa první. Výpočet vychází především z teoretických vztahů uvedených v úvodních kapitolách práce.

Z technického pohledu je druhá etapa výpočtu zahájena průchodem roubíku tryskou. Tím je teoreticky uvolněn prostor pro proudění zhášecího média. Je však nutné brát v úvahu některé základní skutečnosti. Především uvolnění trysky neznamena její plnou průchodnost, protože roubík neopustí prostor trysky okamžitě po průchodu nejužším prostorem, ale po určitou dobu ještě brání plnému průchodu média. Nejužším místem v tomto čase není hrdlo trysky, ale prostor mezi tryskou a roubíkem. Druhým faktorem potenciálně ovlivňujícím průchodnost trysky může být samotný oblouk.

Výpočet je opět prováděn po jednotlivých krocích. V prvním kroku je nezbytné určit přesný okamžik otevření trysky. Tuto hodnotu lze získat z dynamické charakteristiky mechanismu ovládajícího roubík, tedy zpravidla pružiny. V rámci srovnání teoretických závěrů uvedených v této práci s naměřenou skutečností vycházíme ze změřeného pohybu roubíku v čase a měřením na technickém výkresu vypínače uvedeném v příloze 1. Určíme čas a polohu roubíku v době průchodu tryskou. Naměřený pohyb roubíku je podle očekávání lineární v čase, což koresponduje s charakteristikou pružiny. Na základě těchto skutečností bylo možné vytvořit matematickou funkci popisující plochu nejužšího místa průchodu chladícího média. Detailně nemá smysl se touto funkcí zabývat, protože bude muset být sestavena vždy individuálně pro každý typ vypínače, respektive geometrické rozměry trysky a roubíku.

Jakmile byl v prvním kroku (v čase $t_1 + \Delta t$, kde t_1 představuje čas otevření trysky) výpočtu zřejmý tlak v akumulacním prostoru (vypočtený v rámci první etapy výpočtu) a charakteristika, respektive hodnota velikosti „otvoru“ mezi akumulacním prostorem a expanzním prostorem bylo možné spočítat množství chladícího média, které za čas Δt proteče „otvorem“. V souladu s teoretickými úvahami v úvodu práce lze v souladu s literaturou [5] nebo [8] použít pro výpočet hmotnostního toku „otvorem“ vztah

$$G = (0,6 \div 1) \cdot F_{\text{otvoru}} \cdot p_A \cdot \sqrt{\frac{2}{g \cdot R \cdot T}} \cdot \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_E}{p_A} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_E}{p_A} \right)^{\frac{(k+1)}{k}} \right]} \quad /4-1/$$

Úvodní koeficient charakterizuje zúžení vytékajícího plynu daného tvarem trysky. Pro vlastní výpočet byl u všech pokusů použit koeficient 0,8.

Ze získaných výstupů je patrných několik základních skutečností. Průběh hodnot hmotnostního toku je u všech měření relativně podobný, což je dáno především počátečními hodnotami tlaků, které jsou podobné. Dále je zřejmé, že průběh pohybu roubíku lze v měřeném intervalu považovat za lineární. Nepravidelnosti v hodnotách I_z jsou evidentně zapříčiněny chybou měření.

Ze vztahu /4-1/ pro výpočet hodnoty hmotnostního toku vyplývá, že při uvažovaných hodnotách Poissonovy konstanty k roste hodnota G v závislosti na poměru tlaků v akumulacním a expanzním prostoru. Teoreticky tedy může hmotnostní tok růst do nekonečna. To však není pravda. Hodnota G roste pouze do dosažení kritického poměru tlaků, při kterém je výtoková rychlost plynu rovna rychlosti zvuku. Kritickou hodnotu tlaků lze v souladu s literaturou [5] získat ze vztahu

$$\frac{p_E}{p_A} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad /4-2/$$

Při překročení této hodnoty již nezávisí výtoková rychlost plynu a s tím spojený hmotnostní tok na poměru tlaků a plyn vytéká z akumulacního prostoru stálou rychlostí. Zlepšení využití tlakové energie je možné dosáhnout při správné volbě tvaru trysky. Optimálním řešením je pozvolna se rozšiřující část trysky přidané k jednoduchému otvoru, čímž získáme konvergentně-divergentní trysku, nazývanou také Lavalovou tryskou. Tato tryska je používána i u testovaného vypínače. Zmiňovaný tvar trysky poté umožňuje dosažení nadzvukové rychlosti v rozšiřující se oblasti trysky. Maximální rychlost v hrdle trysky je rovna rychlosti zvuku. Tím je dána i omezená hodnota hmotnostního toku.

Z výše uvedených faktů lze vyvodit, že lze určit kritickou hodnotu G . Pokud bude teoreticky vypočtená hodnota hmotnostního toku získaná ze vztahu /4-1/ vyšší než kritická, je nutné pro další výpočty použít kritickou hodnotu G , kterou lze získat ze vztahu

$$G_k = (0,6 \div 1) \cdot F_{otvoru} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{p_A \cdot \rho_A \frac{2k}{k+1}}. \quad /4-3/$$

Z výše uvedených skutečností jednoznačně vyplývá, že lze počítat hmotnostní tok a následně úbytek tlaku jako by šlo o proudění otvorem, a to bez ztráty přesnosti výpočtu.

V dalším kroku je možné jednoduchým způsobem dle [8] dopočítat úbytek hustoty média v akumulacním prostoru způsobeném výše popsaným hmotnostním tokem. Nejprve jednorázově vypočteme hodnotu hustoty plynu v akumulacním prostoru před otevřením trysky, tedy hodnotu ρ_1 . Tato hodnota by měla být v případě plného vytěsnění prostoru trysky roubíkem (úplné těsnosti soustavy) shodná s hodnotou počáteční, což je ostatně jeden z předpokladů přesnosti výpočtu první

etapy. Hodnotu ρ_1 tedy získáme jednoduše ze stavové rovnice plynu, protože známe jak teplotu, tak i tlak v akumulacním prostoru dle vstupních hodnot. Výsledná hodnota hustoty média v prvním kroku (v čase $t_1 + \Delta t$, kde t_1 představuje čas otevření trysky) v $t_1 + \Delta t$ tedy bude

$$\rho_{t+\Delta t} = \rho_1 - \frac{G_1 \cdot \Delta t}{V_A} . \quad /4-4/$$

Úbytek hustoty média je dán podílem odvedené hmotnosti a objemu akumulacního prostoru.

V této fázi výpočtu, kdy máme v prvním kroku známé hodnoty tlaků, průřezu „otvoru“, hmotnostního toku a hustoty je třeba provést jistá zjednodušení. Především je třeba konstatovat, že pro kroky výpočtu ovlivněné proudícím médiem budeme tyto děje považovat za isotermické. Toto zjednodušení se příliš neliší od experimentálních závěrů, navíc díky malým rozptylům stavových veličin v uvažovaném spektru teplot nemůže být do výpočtu zavlečena větší chyba. Platí tedy

$$\frac{p_2}{\rho_2} = \frac{p_1}{\rho_1} \quad /4-5a/$$

respektive

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1} . \quad /4-5b/$$

Díky uvedenému zjednodušení je možné dopočíst hodnotu tlaku v akumulacním prostoru. Výše uvedený vztah lze chápat tak, že kolikrát se za čas Δt změní hodnota hustoty v akumulacním prostoru, tolikrát se změní vlivem proudění tryskou i hodnota tlaku za čas Δt . Hodnota tlaku určeného druhou etapou výpočtu v čase $t + \Delta t$ vlivem proudění tedy bude

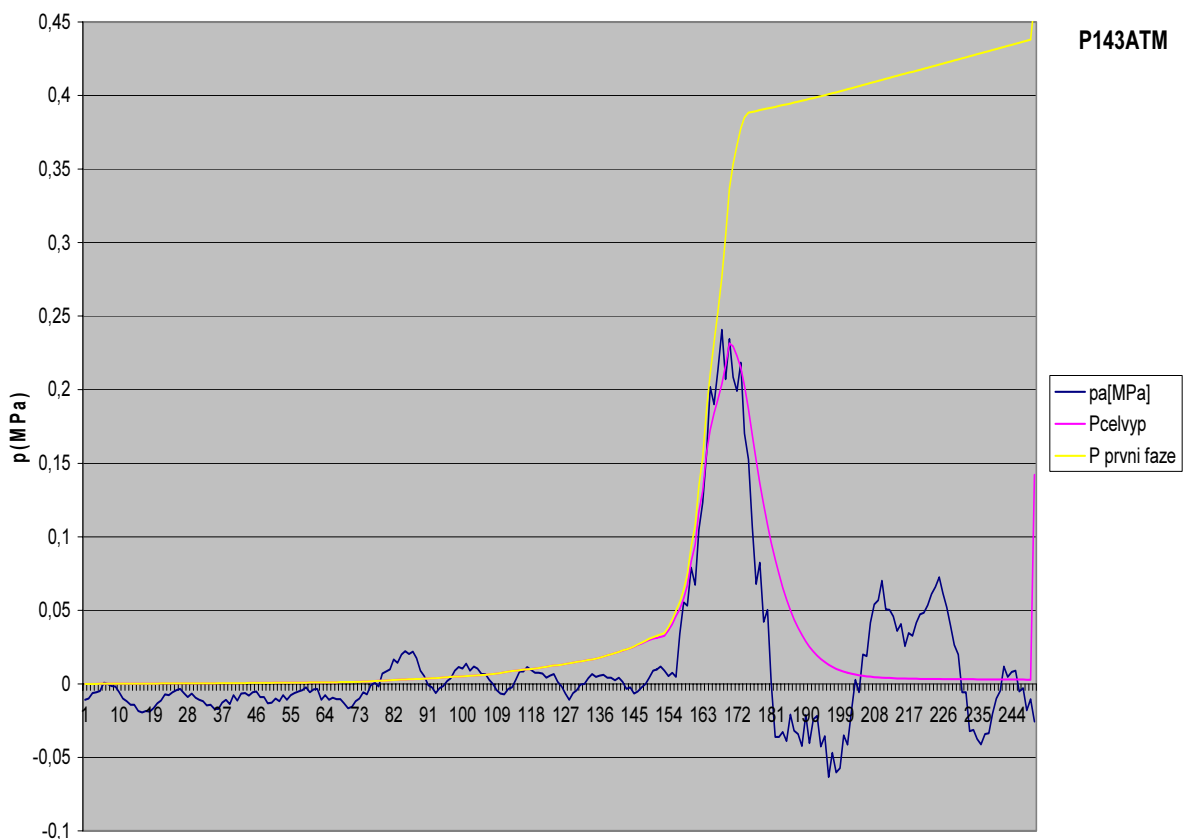
$$p_{A(t+\Delta t)}^{II} = p_t \cdot \frac{\rho_{t+\Delta t}}{\rho_t} . \quad /4-6/$$

Protože hodnota hustoty bude podle předpokladu po otevření trysky trvale klesat, bude mít vliv i na klesající hodnotu tlaku. Výsledný tlak v každém kroku bude tedy složen z faktoru podporujícího nárůst tlaku určeného energií oblouku (vztah /3-7/, určující výsledný vztah pro výpočet tlaku z první etapy výpočtu) a faktoru snižujícího tlak vlivem proudění. Výsledný vztah pro tlak v čase $t + \Delta t$ ovlivněný oběma faktory tedy bude

$$p_{Acelk(t+\Delta t)} = (p_{t+\Delta t}^I + p_{t+\Delta t}^{II}) = (p_{Acelk(t)} + k \cdot gR \frac{U_{obl} \cdot I \cdot (1 - k_{ztrat})}{c_p \cdot V_A} \Delta t) \cdot \frac{\rho_{t+\Delta t}}{\rho_t} \quad /4-7/$$

To je prakticky celkový a výsledný vztah pro praktický výpočet tlaku v akumulčním prostoru vypínače.

Pro názornost prezentuji výsledné hodnoty tlaku na vybraném měření. Průběh naměřených hodnot tlaku v akumulčním prostoru je v grafu znázorněn modrou barvou. Hodnota tlaku vypočtená v první etapě výpočtu je zobrazena žlutě a výsledná vypočtená hodnota fialovou barvou.



Graf11 průběhy tlaků pokusu označeného jako P143ATM

Obdobné grafy pro všechny pokusy jsou uvedeny v příloze 3 disertační práce.

5 ZÁVĚRY Z VÝPOČTU TLAKU V AKUMULAČNÍM PROSTORU

Celý postup výpočtu byl podrobně popsán v předchozích kapitolách. Stěžejní myšlenkou celého řešení je rozdělení výpočtu na dvě fáze, dva základní vlivy určující výsledný tlak v akumulacním prostoru. Poměrně jednodušší byla první fáze výpočtu určená energií oblouku, která přispívá k nárůstu tlaku. Důležité je si uvědomit, že energie oblouku dodaná do akumulacního prostoru je určující pro nárůst tlaku bez přímé závislosti na absolutní hodnotě tlaku. Tohoto faktu jsem využil při skládání obou vlivů. Naopak v druhé fázi výpočtu bylo třeba velice opatrně nakládat s hodnotami okamžitého tlaku a hustoty, které jsou určující pro množství protékajícího média. Tyto skutečnosti nakonec přispěly k tomu, že bylo možné odvodit a numericky ověřit výsledný vztah určující tlak v akumulacním prostoru vypínače. Důležité je i zjištění, že tvar trysky zásadně neovlivňuje množství protékajícího plynu, protože to je dáno nejužším místem trysky, kde maximální průtoková rychlost nepřesáhne lokální rychlost zvuku.

Během výpočtu bylo učiněno několik zanedbání. Ty byly komentovány vždy v příslušné etapě výpočtu. Je však vhodné se k některým z nich vrátit. Především je možné v dalším zpřesnit výpočet o hodnoty tlaku v expanzním prostoru. Toto rozšíření výpočtu pravděpodobně nepředstavuje výrazný nárůst složitosti výpočtu, na druhé straně by mohlo výpočet zpřesnit a dodat i některé nové hodnoty použitelné při konstrukci vypínače. Druhým faktorem, který stojí za zamyšlení je určitě hodnota průřezu a objemu oblouku. Při konkrétních vstupních hodnotách v uvažovaném vypínači byly tyto hodnoty zanedbatelné, což bylo dáno především relativně vysokými hodnotami tlaků, ale v případě nižších tlaků a zejména při proudění vysokou rychlostí může docházet k růstu rozměru oblouku. Ten potom může částečně nebo i zcela v určitém časovém okamžiku vytěsnit prostory v trysce a měnit charaktery proudění. Zavedení i tohoto faktoru do výpočtu je principiálně možné.

Bylo by zřejmě ideální v této fázi přesně vyčíslit chybovost výpočtu tlaku v akumulacním prostoru podle popsané metodiky. Domnívám se však, že protože nebyly k dispozici jiné vypínače, na kterých bych mohl své závěry ověřit, byly by sebestředněji vypočítané chybové odchylky stejně neobjektivní. Navíc i ze získaných naměřených hodnot je zřejmé, že i samotné měření není zcela přesné. Spokojím se tedy s konstatováním, že i přes výše zmiňovaná zanedbání se výsledná chyba výpočtu pohybuje v rozpětí od 10% do 20%, což je v souladu se vstupními požadavky.

6 VÝPOČET CHARAKTERISTIKY PROUDĚNÍ V TRYSCE

Stěžejními fyzikálními parametry, které je žádoucí sledovat v trysce jsou především průběh tlaku a rychlosti proudění, respektive Machova čísla. Vstupními vztahy jsou opět vztahy popsány v teoretické části práce [12]. Klíčovým vztahem pro další úvahy je především vztah mezi změnou průřezu v trysce a Machova čísla

$$\left(\frac{F_2 \cdot M_2}{F_1 \cdot M_1}\right)^2 = \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_2^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \quad /6-1/$$

Pro zahájení výpočtu bylo nejprve nutné získat vstupní podmínky, hodnotu M ve známém místě trysky. Za tuto známou oblast je nejlépe považovat vstupní hranu trysky, protože v tomto bodě známe v začátku proudění i další potenciálně sledované veličiny, jako je tlak nebo hustota.

Hodnota Machova čísla je poměrem mezi rychlostí proudění a lokální rychlostí zvuku. Rychlost proudění na rozmezí trysky a akumulárního prostoru je možné získat například z Saint-Venantovy rovnice, která je blíže popsána například v literatuře [8]. Hledanou rychlost lze díky známým hodnotám tlaku, hustoty a Poissonovy konstanty v akumulárním procesu prakticky v libovolném okamžiku procesu vypínání vyčíslit ze Saint-Venantovy rovnice

$$c_A = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_A}{\rho_A} \left(1 - \left(\frac{p_E}{p_A}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad /6-2/$$

Derivací Saint-Venantovy rovnice nebo z literatury je možné získat i vztah pro rychlost zvuku

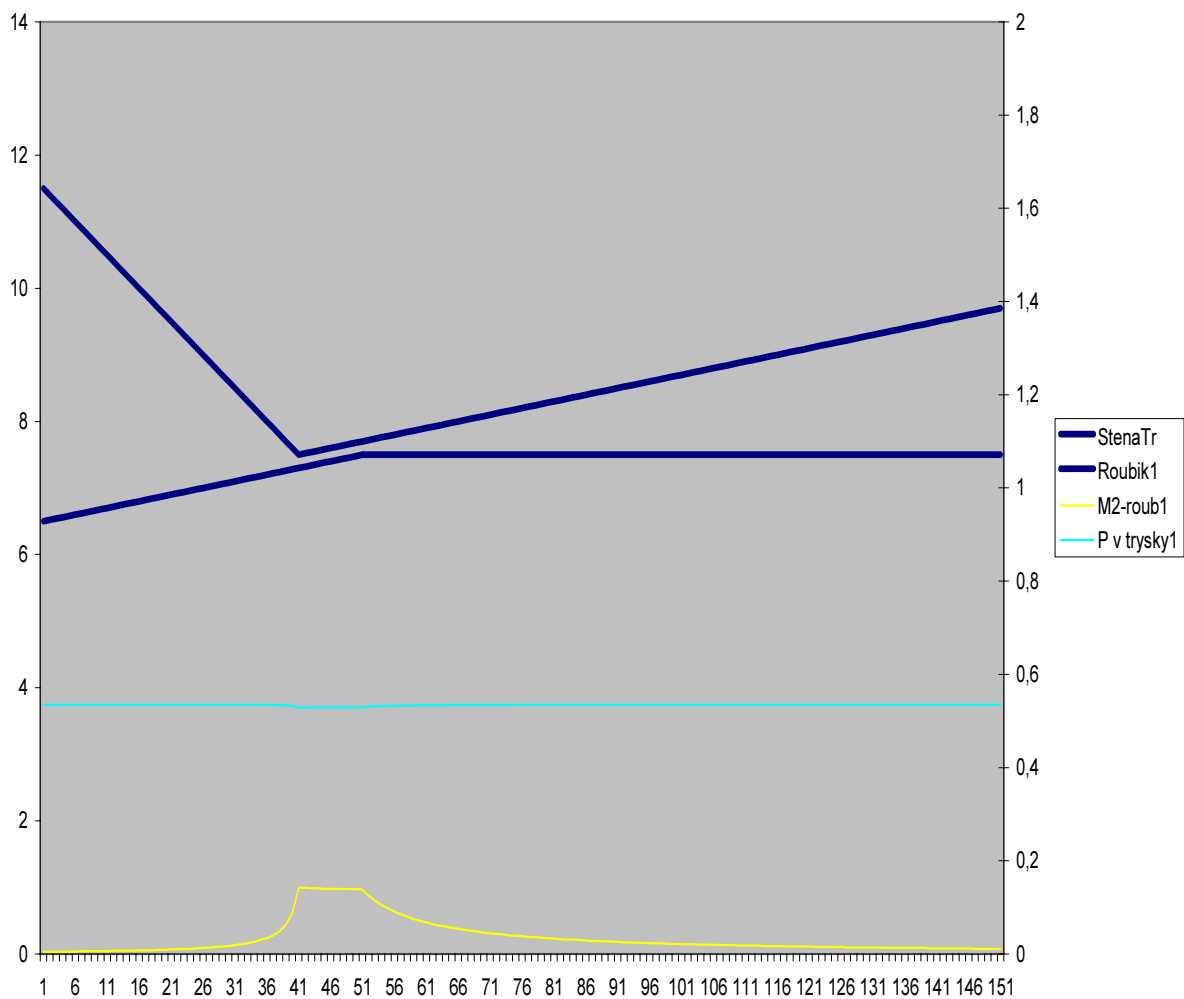
$$a_A = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_A}{\rho_A}} \quad /6-3/$$

Následně podílem získáme Machovo číslo. Druhým vstupním parametrem je hodnota F_x , tedy „průchozí“ průřez trysky v libovolném bodě. Zde je možné využít dříve popsanou funkci, která určuje průřez trysky v libovolném bodě. Jak jsem již uvedl, nemá cenu se touto funkcí zabývat, protože bude nutné ji sestavovat vždy individuálně. Podobná situace je i s roubíkem, pouze s tím rozdílem, že roubík se navíc pohybuje. Výsledný „průchozí“ průřez v libovolném bodě je poté rozdílem obou

hodnot. Tuto situaci jsem řešil tak, že jsem si trysku rozdělil na 150 částí a v každé části potom počítal hledané hodnoty. První hodnotou byla vždy hodnota na hraně trysky, tedy hodnota určená parametry akumulárního prostoru.

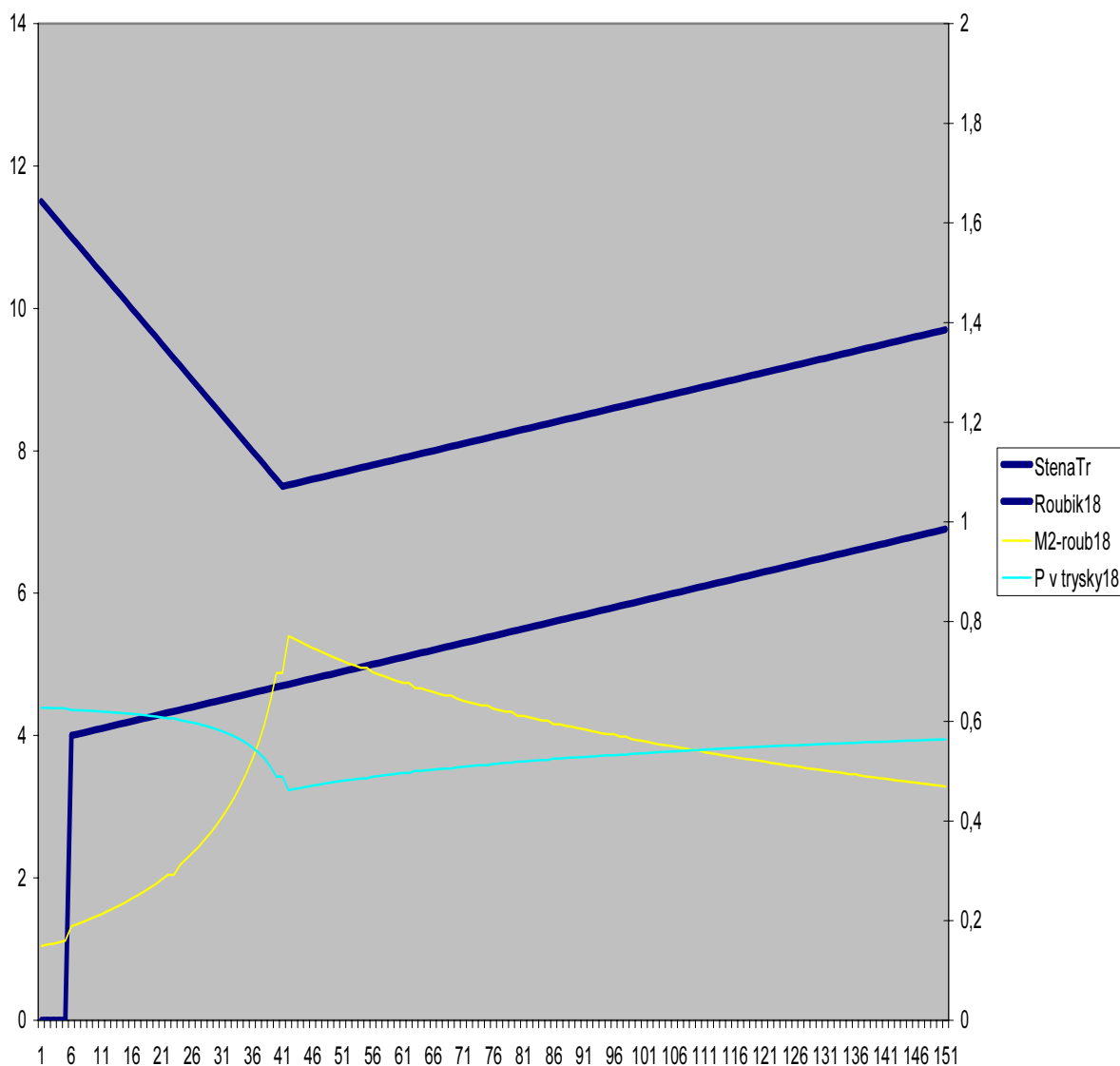
V této fázi jsem již předpokládal triviální užití vztahu /6-1/. Problém nastal v okamžiku, kdy jsem začal hledat analytické řešení zmiňované rovnice. To bohužel neexistuje. Celou záležitost jsem konzultoval na katedře matematiky Jihočeské univerzity se stejným závěrem. Našel jsem tedy po konzultaci kompromisní řešení samostatného výpočtu levé a pravé strany rovnice /6-1/ a poté jejich porovnání. Pro výpočet jsem vyšel z předpokladu, že hledaná hodnota Machova čísla se pohybuje v intervalu (0;3), při kroku 0,001. To bylo nutné řešit samostatným programem. Protože jsem chtěl zachovat jednoduchost celého řešení, dal jsem si podmínku, že funkce bude nativně volána z prostředí Microsoft Excel, ve kterém jsou i ostatní výpočty. Nejjednodušším řešením se ukázalo použití skriptu v jazyce Visual Basic. Toto řešení jsem použil bez větších obtíží. Drobné problémy se ukázaly pouze při vlastním výpočtu, protože funkce vykazuje několik lokálních extrémů, a ty potom komplikují výpočet popisovaným postupem. Řešením by jistě bylo zjemnění kroku výpočtu, avšak na úkor času výpočtu. Visual Basic je interpretem, takže vlastní doba výpočtu není zanedbatelná. Výpočet Machova čísla byl úspěšný. Poté jsem triviálním způsobem využil přepočtové rovnice pro získání tlaku v trysce.

Vlastní výpočet jsem počítal ve 28 fázích pohybu roubíku vzhledem k trysce. Každá fáze je počítána ve 150 bodech, poté jsou hodnoty proloženy grafem. V grafu je pro přehlednost znázorněna i tryska a roubík. Hodnota Machova čísla je zobrazena žlutou barvou, tlak zelenou a pevné části modrou barvou. První fáze nastává krátce po otevření trysky. Pro ukázkou v textu práce jsem si vybral měření označené jako P145ATM.



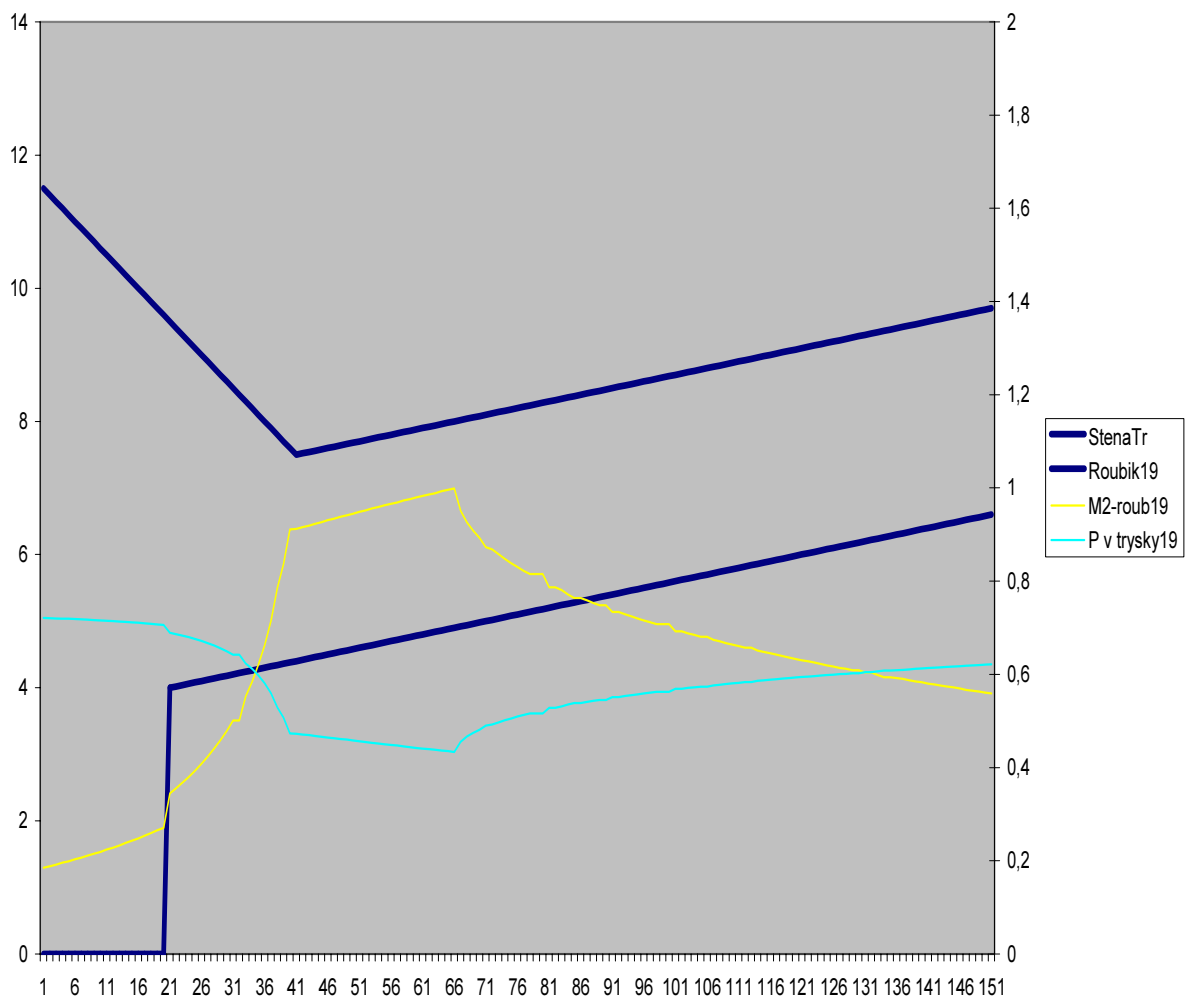
Graf14 měření označeného jako P145ATM-fáze1

Je zřejmé, že díky malému tlakovému gradientu po otevření trysky není proudění nijak intenzivní a to dokumentuje i malá hodnota Machova čísla. Tento stav setrvává přibližně do fáze 18, jak dokumentuje následující graf.



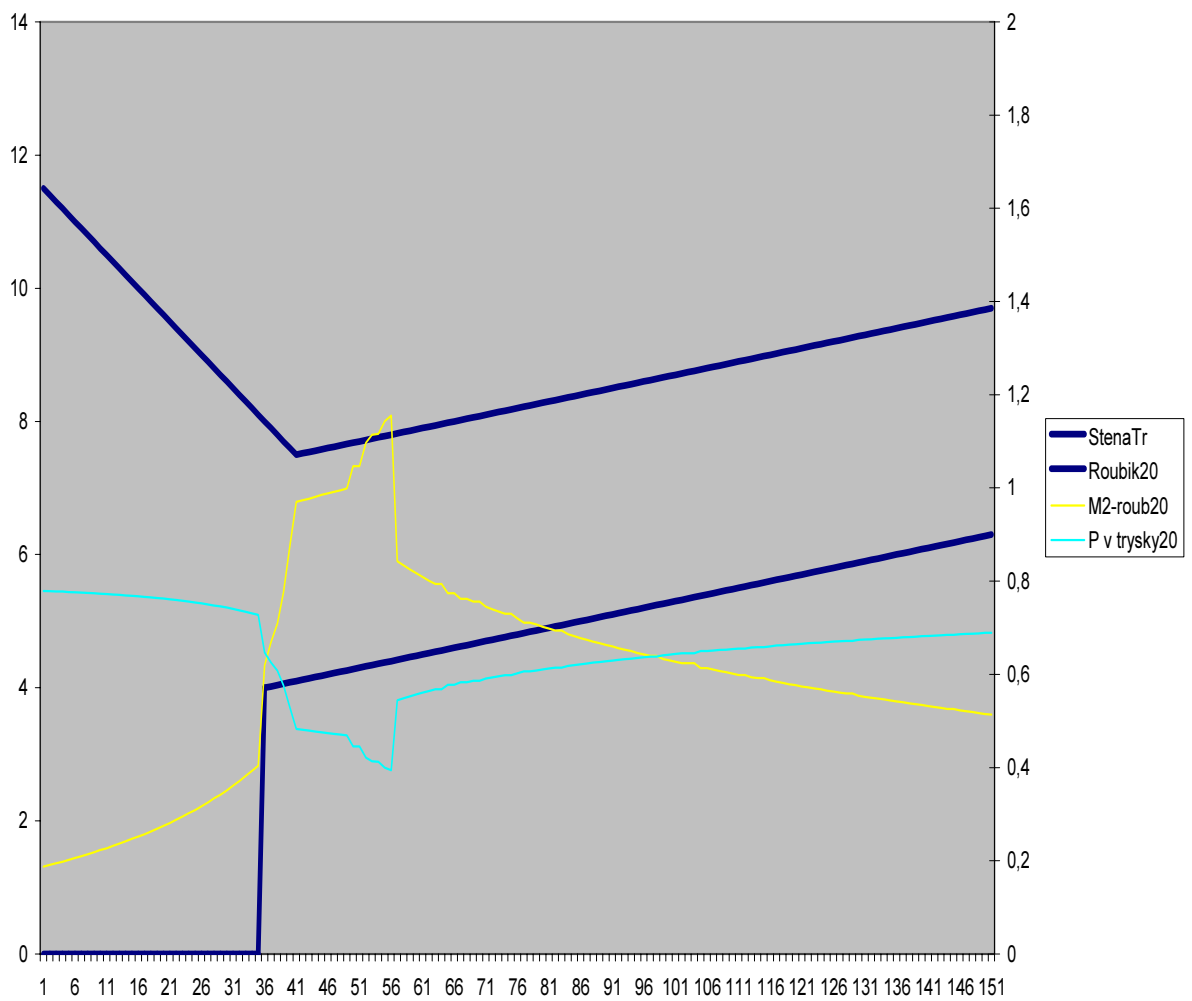
Graf16 měření označeného jako P145ATM-fáze18

Na tomto grafu je již patrné, že se maximální hodnota Machova čísla přibližuje hodnotě 1, tedy že poměr tlaků se blíží kritické hodnotě. V případě dalšího nárůstu tlaků lze očekávat překročení $M=1$ za hrdlem trysky. To se také ve fázi 19 měření P145ATM stalo.



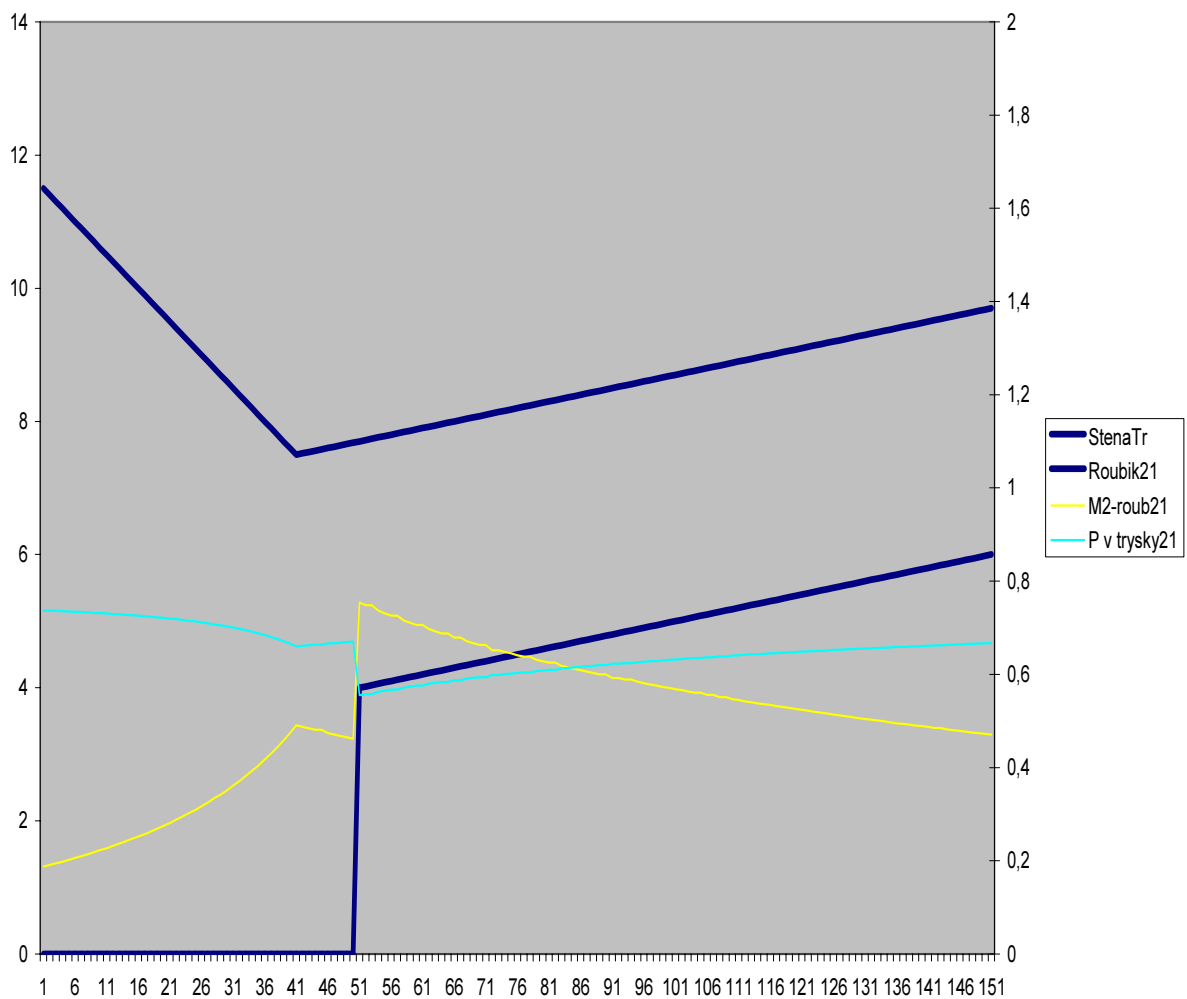
Graf17 měření označeného jako P145ATM-fáze19

V případě dalšího nárůstu tlaku by mohlo Machovo číslo v prostoru za hrdlem trysky dále růst, což má jednoznačně pozitivní vliv na uhasnutí oblouku. Na druhé straně se v této oblasti začnou tvořit značné turbulence, které proudění zpomalují. Další vývoj ukazuje graf fáze 20.



Graf18 měření označeného jako P145ATM-fáze20

Na tomto grafu je v rámci pokusu P145ATM proudění nejintenzivnější. Je patrný prudký nárůst rychlosti za hrdlem trysky a poté skokový pokles hodnoty Machova čísla. V dalších fázích je již patrné, že došlo k „vyfouknutí“ tlaku z akumulárního prostoru a průběh obou veličin se již stabilizoval.



Graf19 měření označeného jako P145ATM-fáze21

Z grafu jsou patrné ostré zlomy na hrdle trysky a čele roubíku. Jinak je průběh velice podobný, jako v úvodních fázích měření.

Možnost zobrazit na základě vypočtených hodnot průběh Machova čísla a průběh změny tlaku podél trysky je po určení tlaku v akumulacním prostoru druhým stěžejním závěrem mé práce. Domnívám se, tato animace je velmi přínosná pro další vyšetřování tlakových poměrů ve VN vypínači a bude přínosná i pro snadné modelování proudění v trysce. Navíc se tímto způsobem ověřily teoretické závěry z předchozích kapitol a tím byla prokázána životaschopnost metody pro další technické použití.

7 ZÁVĚR

Středem zájmu mé práce bylo především určení tlakových poměrů v komorách vypínače a rychlosti proudění v trysce. Tento cíl byl bezezbytku splněn a odhadovaná přesnost výpočtu je mezi 10% a 20%, což je v souladu s očekáváním. Matematicky práce vycházela z termodynamických vztahů pro jednorozměrové proudění uvedených v teoretické části práce, ale zohlednila i některé další faktory. Jsou to především energie oblouku a pohyb roubíku.

V první části byly provedeny výpočty s použitím odvozených vztahů pro tlakové poměry v komorách a pro výpočet rychlosti v proudění v trysce bez dalších úprav. Tento krok umožnil posoudit základní přesnost výpočtu, resp. potvrdit závěry práce G.A.Cividjiana, která však zůstala na půli cesty. Sice přesným, a použitelným způsobem popisuje průběh proudění v trysce v konkrétním okamžiku, vůbec však nebere v úvahu změnu podmínek, které toto proudění pro další výpočet působí. Znamená to například, že bez dopočtu změn tlaku z akumulacím prostoru by byl výpočet nepoužitelný.

Porovnání celkové přesnosti výpočtu bylo provedeno proti naměřeným veličinám a jednoznačně potvrdilo použitelnost v této práci navržené, relativně jednoduché metody pro praxi, což bylo jedním z cílů práce.

Zvláštní pozornost byla ve výpočtu věnována proudění v trysce. Chování proudu média je limitováno především geometrickými vlastnostmi trysky a fyzikálními vlastnostmi média. Tvar trysky byl do výpočtu zadán jako vstupní veličina. Tryska je otevírána při průchodu pohyblivého kontaktu postupně, což značně ovlivňuje průběh proudění zhášecího média a tím i chování zhášecího mechanismu. Následně je průchodnost trysky omezována samotným obloukem, což může v mezním případě vézt až k ucpání trysky.

Celá práce není přínosná tím, že by přinesla zcela nové chápání problému. Tato práce je přínosná zejména celkovým přístupem, kompletní aplikací teoretických poznatku zejména z oblasti termodynamiky na konkrétní technické zařízení, což podle mě dostupných informací ještě provedeno nebylo. Výstupem jsou především výpočty v tabulkách MS Excel, které je možné aplikovat jako šablony pro další výpočty na dalších, reálných vypínačích či pro pedagogické účely. Příprava na výpočet parametrů zcela nového vypínače bude podle mých zkušeností po pochopení principu a využitelnosti tabulek asi den práce, vlastní výpočet potom maximálně jednu hodinu. To je podle mého názoru přijatelné a těžko hledat další prostor pro zkracování času. Po ukončení výpočtu je ale možné triviálním způsobem manipulovat se vstupními parametry, například geometrickými rozměry trysky, komory, nebo plnicím tlakem, a tím na teoretické úrovni případně optimalizovat návrh nového zařízení.

Současný postup výpočtu je uceleným a, byť na jediném vypínači, ověřeným postupem ve výpočtu tlaků ve VN vypínači. Lze s ním však dále pracovat. V případě

potřeby či snahy o sledování některého konkrétního bodu vypínače je možné doplnit do řešení další vlivy. Rozhodně by v dalším kroku měly být dořešeny změny parametrů v expanzním prostoru, jak již bylo uvedeno v textu. Poměrně snadno je možné získat jak hustotu, tak i tlak v této oblasti. To bude určitě znamenat další upřesnění výpočtu. Dále je možné se více soustředit na vliv oblouku, ne snad až tolik z pohledu energie, ta je dle mého názoru řešena v této práci zcela dostatečně, ale především vliv objemu oblouku v akumulacním či expanzním prostoru a zejména v trysce. Nedořešenou otázkou zůstal i problém rázových vln nebo turbulencí při vysoké rychlosti proudění.

Vizí vzdálených cílů této práce by mohlo být i určení parametrů uhasnutí oblouku. V případě dosažení kvalitních a relativně přesných výsledků by potenciálně dle mého názoru bylo možné analyticky určit, v kterém časovém okamžiku v závislosti na vstupních parametrech oblouk uhasne a následně případně vytipovat parametry proudu, které by pro daný konkrétní vypínač byly limitující. Tyto práce již souvisí s vytvořením vhodného fyzikálně-matematického modelu a jeho aplikaci na konkrétní podmínky. Z nedávno uveřejněných prací vyplývá, že tímto vhodným modelem je P-T model Mayrovského typu, který byl pro podobné podmínky již sestaven [11]. Realizovatelnost takových cílů však ukáží až konkrétní výsledky.

8 LITERATURA

- [1] Dejč M. E., „Technická dynamika plynů“, SNTL-Nakladatelství technické literatury, Praha 1967, 660 stran, DT 533.6.011.004
- [2] Cividjian G. A., Georgescu G., Popela R., Bartl J., Vávra Z., „One dimensional gas flow in circuit-breaker nozzle“, University of Craiova 1998, RO-1100 Craiova, Dezrobirii F1-1-1
- [3] Filakovský K., Popela R., Bartl J., Vávra Z., „Struktura proudu zhášecího média ve vypínači VN“, Inženýrská mechanika 1999, Svatka
- [4] Filakovský K., „Zpráva k řešení grantového úkolu GAČR 102/97/0253“, VUT Brno 1999
- [5] Šenk J., „Elektrodynamika vysokoteplotních systémů - prozatímní učební texty“, VUT FE Brno, Ústav speciální elektrotechniky
- [6] Budiš P., „Vyšetřování axiálně ofukovaného elektrického oblouku“, Diplomová práce na Ústavu elektrických strojů a přístrojů VUT Brno, 1994
- [7] Bartl J., Acta Technica ČSAV, 1980, č.1, str. 41, Calculated values of the specific heat. Poisson constants and velocities of sound of pure sulphur hexafluoride.
- [8] Kalčík J., Technická termodynamika, Nakladatelství ČSAV, Praha 1960, 514 stran, DT 536.7-62, první vydání
- [9] Eby S. D., Trépanier J. Y., Zhang X. D., Modelling radiative transfer in SF₆ circuit-breaker arcs with the P-1 approximation, Appl. Phys. 31, 1998, UK, S0022-3727(98)91205-0
- [10] Murai Y., Yamaji S., Miyamoto T., Sasao H., Ueda Y., An improvement of low current interrupting capability in self-interruption GCB, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-101, No. 2, February 1982
- [11] Samek R., Vávra Z., Study of dynamic phenomena in the vicinity of the current zero, in XVTH Symposium on physics of switching arc, vol. I, pages 166-169, September 22-26, 2003

9 CURRICULUM VITAE

Petr Budiš narozen 1970 v Boskovicích, ČR

Vzdělání 1996 – 2003 VUT FEKT Brno, Ph. D. student

1994 – 1996 VUT Brno, studium pedagogické způsobilosti

1988 – 1994 VUT FEI Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Maturitní studium: 1984 – 1988 Gymnázium Boskovice

Zkušenosti práce v oblasti IT s různými OS a programovacími jazyky, znalosti a zkušenosti v oblasti počítačové bezpečnosti a bezpečnosti obecně, vedení týmu, presentační a školící zkušenosti

Pracovní zkušenosti 1994 – do současnosti PVT, a.s.

1994 – 1996 programátor a vedoucí týmu

1996 – 1999 zakladatel a ředitel projektu I.CA

1999 – 2002 ředitel vývoje a.s.

2002 – do dnes obchodní ředitel

od 2001 předseda představenstva I.CA

od 2002 předseda dozorčí rady DTCA

od 2002 člen představenstva PVT Slovakia

ABSTRAKT

Obsahem této práce je výpočet vybraných fyzikálních veličin ve vypínači vysokého napětí pomocí termodynamických vztahů.

Cílem práce je určení tlakových poměrů v jednotlivých částech vypínače po celou dobu zhášecího procesu a modelování rychlosti proudění a tlakových změn v trysce vypínače.

ABSTRACT

Substantiality of my dissertation thesis is calculation selective physical quantity in high voltage switch by using thermodynamic relation.

Objective of my dissertation thesis is assignation pressure attitude odd parts switch in all period of turning off process and speed simulation of convection and pressure changes in the nozzle of the switch.