

S postupným vývojem a dílčími změnami v provozu elektrizační soustavy dochází i ke změnám podmínek, při nichž dochází k vypínání provozních či zkratových proudů. Předkládaný příspěvek se zabývá možnostmi, které poskytují softwarové nástroje pracující na principech řešení parciálních rovnic numerickými metodami konečných prvků či konečných objemů při řešení specifických spínacích operací jako je např. spínání malých kapacitních proudů. Příspěvek tak představuje teoretickou i praktickou část problematiky spínání malých kapacitních proudů a praktickou využitelnost modelovacích nástrojů.

MOŽNOSTI VYUŽITÍ VÝPOČETNÍCH MODELOVACÍCH NÁSTROJŮ PRO ANALÝZU MIMOŘÁDNÝCH SPÍNACÍCH JEVŮ

Vladimír Vajnar, Jana Jiříčková, Jan Sedláček
Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni

1. ÚVOD

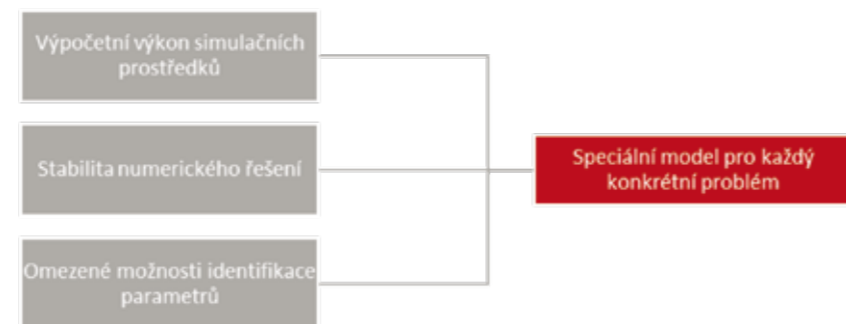
V uplynulých desetiletích došlo k masivnímu rozvoji aplikované matematiky. Tento rozvoj, probíhající ruku v ruce s obrovským zdokonalením výpočetní techniky, významnou měrou přispěl k možnostem modelování mnoha fyzikálních dějů probíhajících v inženýrských aplikacích. Díky těmto možnostem pak lze snáze dosáhnout optimalizace daných aplikací s ohledem na bezpečnost či ekonomiku provozu, provozní ztráty či principiální funkčnost zařízení.

Možnosti využití těchto modelovacích nástrojů podchycují téměř veškeré energetické aplikace v celém řetězci od výroby (modely točivých strojů) přes přenos a distribuci (modelování transformátorů či spínací techniky) až ke spotřebě (obvodové či fyzikální chování spotřebiče). Ve spínací technice (vypínače, odpojovače, úsečníky, odpínače) je tak díky uplatnění mnoha fyzikálních jevů možné věnovat se modelování dílčích podsystemů – kontaktní ústrojí, mechanický návrh, oteplení proudové dráhy, dielektrické namáhání, proudění chladicího média, ionizační procesy, apod.

Následující článek popisuje obecný postup při zpracování modelů řešících problémy spojené s vypínacími procesy v energetice, jejich limitace teoretické i praktické limitace a konkrétní příklady modelů z vypínací techniky.

2. OBECNÝ POSTUP MODELOVÁNÍ FYZIKÁLNÍCH PROBLÉMŮ

Samotný účel konkrétního modelu je silně závislý tom, jakou reálnou aplikaci znázorňuje a jaké výsledky od modelu očekáváme. Obecně lze říci, že fyzikálním polem se rozumí rozložení určité veličiny, či veličin v prostoru či v čase. Fyzikálním polem



Obrázek 1 Metodika modelování přechodných dějů

tak lze rozumět i schéma elektrického obvodu, jež interpretuje rozložení napětí, proudů v daných pasivních prvcích (rezistorech, indukcích či kapacitách). Jedním ze základních přístupů k modelování v energetice je tak obvodové modelování, kdy v daném nástroji interpretujeme konkrétní elektrický obvod.

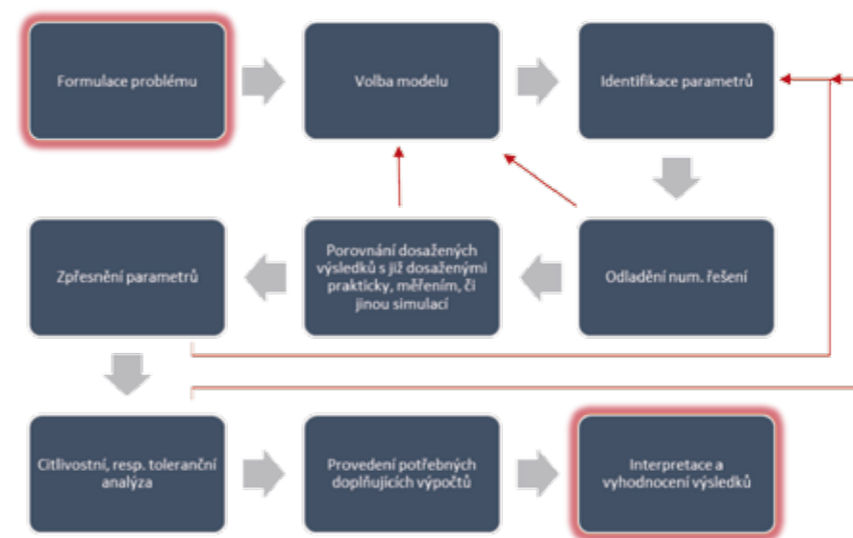
Nejběžněji se s obvodovým modelováním setkáváme v analýze ustálených stavů (load-flow), či některých přechodných dějů. Důležitým faktorem pro výsledné průběhy je to, jakými prvky je obvodové modelování zpracováno. Např. je-li třeba analyzovat nesymetrie v distribuční síti, je nutné zohlednit indukční a kapacitní vazby mezi jednotlivými fázemi, ať již na úrovni výroby či rozvodu. Už v samotném počátku zpracování modelu je tak nutné vědět, jaké výsledky jsou očekávány a zda model dostatečně reprezentuje skutečnost.

Tentýž požadavek platí i v případě časoprostorového modelování fyzikálních polí. Na jednu stranu výhodnější se zde může zdát fakt, že reálná aplikace je mnohem zřejmější a snadněji představitelná, což je však vykoupeno složitějším mate-

matickým aparátem a nutnými prostředky k řešení. Tento matematický aparát ještě narůstá na složitost v případě více dimenzí či uplatnění většího počtu fyzikálních polí (např. interakce mezi elektrickým a teplotním polem).

Protože prostředky matematické analýzy jen velmi zřídka postačují ke skutečnému analytickému řešení, je nutné se tak opřít o prostředky numerické matematiky a numerických metod. Zatímco v případě obvodového modelování lze řešit jen soustavu obyčejných diferenciálních rovnic, v případě časoprostorových modelů se již jedná o soustavy parciálních diferenciálních rovnic. Ty v současné době tvoří samostatnou část v oboru matematické analýzy.

Obrázek 1 znázorňuje složitosti modelování a nutnost zpracování samostatného modelu pro každý konkrétní problém. Zatímco výpočetní výkon současných počítačů je obrovský a poskytuje široké spektrum možností (nárůst paměti, úložného prostoru, paralelní výpočty, ...), problém stability numerického řešení a možnosti identifikace vstupních parametrů však zůstává závislý na schopnostech každého, kdo daný model zpracovává.



Obrázek 2 Obecný postup při modelování v energetice

Obrázek 2 podrobněji popisuje postup při vypracování modelů.

V oblasti Formulace problému je nutné zvolit rozsah, ohraničení a charakter problému, zda se jedná o ustálený či provozní stav, a které fyzikální aspekty jsou podstatné a rozhodující. V oblasti Volby modelu je nutné postupovat od co nejjednoduššího (jež však bude respektovat všechny požadavky zvolené v předchozím kroku) a rozšířit o všechny podstatné veličiny, včetně souřadnicových systémů, též je nutné formulovat vztahy umožňující řešení příslušných dějů v závislosti na rychlosti těchto dějů, linearitě, prostředí, symetrii, apod. Všechny tyto vlastnosti podmiňují stabilitu numerického řešení. Identifikace parametrů je zásadní pro věrohodnost a úroveň získaných výsledků a měla by se opírat o reálný systém, tedy předchozí měření či výpočty, případně vzájemnou kombinaci. Odladění numerického řešení je otázkou spíše zkušeností, jelikož se obvykle odvíjí od výkonu a kvality použitého SW/HW či času, jakým jsme při výpočtech limitováni. Po prvním úspěšném či iniciačním výpočtu je vhodné porovnat získané výsledky s již získanými (ať již na základě měření, analytického řešení či linearizovaného modelu). Obvykle jde opět spíše o zkušenosti konkrétního pracovníka a konkrétní postup prakticky nelze popsat. V následujícím kroku pak právě v závislosti na tomto lze laděním upravit vstupní parametry, zejména ty odhadované. Citlivostní analýza pak tvoří opakovaný proces určování odezvy získávaných parametrů na změny vstupních parametrů či snahy o zjištění nejcitlivějších parametrů. Z citlivostní analýzy je tedy vhodné opakovat výpočty od primární identifikace parametrů. Citlivostní analýza tak tvoří důvěrohodnost a integritu provedeného modelu a do určité míry potvrzuje či vyvrací předpokládané skutečnosti. Poté již lze provést dodatečné výpočty pro získání celistvosti potřebných výsledků či dodatečný analýz (frekvenční či přenosové odezvy). Poté lze

výsledky kontrolovat s alternativně dosaženými a zvolit vhodnou formu publikace

3. PŘÍSTUPY K MODELOVÁNÍ PROBLÉMU VE SPÍNACÍ TECHNICI

V aktuální energetické praxi lze rozlišovat mezi modelováním ustálených stavů a přechodných dějů. Vzhledem k tomu, že samotná hierarchie modelování ustálených stavů v energetice je mírně odlišná, využívající jiné prostředky matematické analýzy a numerické matematiky, je možné se v následujícím textu omezit jen na přechodné děje. Je však vhodné zmínit fakt, že zejména v počáteční fázi (formulace problémů) a konečné fázi (doplňující výpočty a interpretace výsledků) je metodika obdobná.

Typ pole	Charakter pole a typická aplikace
Elektrické	statika – rozložení elektrického pole v okolí venkovního vedení proudové – rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče, oteplování, síly
Magnetické	statika – permanentní magnety časově proměnné – indukční zákony, magnetické síly
Tepelné	ohřev vodiče, šíření tepla v rozvaděči, ochlazování proudových drah
Mechanické	pevnostní analýzy – statické zatížení, dynamické namáhání, rezonance, životnost
Vysokofrekvenční	elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Tabulka 1 Přehled typických typů polí a příkladů jejich reálných aplikací v energetice

Jedním ze základních problémů ve spínací technice je kontaktní ústrojí, kde je rozhodujícím faktorem oteplení, jde tak o sruzenou úlohu elektrického proudového pole a teplotního pole. Podrobnou představou o šíření tepla v okolí kontaktního spoje nám v tomto případě poskytuje prostorový model kontaktního ústrojí, některé aplikace však zcela vystačí s jednodušší reprezentací a to např. metodou tepelné sítě, což je speciální forma obvodového znázornění tepelných toků. Tuto metodu lze použít při zjišťování oteplení pevných částí zařízení, např. odpojovače.

Pro modelování vypínacích procesů, kde je rozhodujícím fyzikálním jevem elektrický oblouk, je situace o poznání komplikovanější, jedná se o fúzi elektrického a teplotního pole za účasti proudícího plynu kolem plazmatu elektrického oblouku. Možnosti pro obvodové znázornění oblouku zpracovali Cassie a Mayr do svých původních teoretických prací o elektrickém oblouku. I přes značné zdokonalení, jakých se tyto modely dočkaly, se jedná o poměrně vhodné modely, které vypovídají o základním chování elektrického oblouku při vypínání v obvodu.

V případě časoprostorového modelování se jedná díky složité geometrii, účasti několika fyzikálních polí a rychle proudícího plynu o silně nestacionární úlohu. Pro jednodušší výpočty, kde nás zajímá např. jen rozložení elektrického potenciálu je situace nikoliv tak komplikovaná, ale účast proudícího média s sebou přináší složitou fyziku nelineárního problému.

4. PŘEHLED SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ

V současné době existuje spousta možností využití simulačních nástrojů. I přes to, že záměr a důvod jejich využití by měl být stejný, jednotlivé nástroje se od sebe mohou odlišovat ve spoustě hledisek, můžeme jmenovat např. platformní podporu, vlastní řešiče, uživatelské rozhraní, cena, typy fyzikálních polí či doplňující knihovny materiálů, prostředí, závislostí apod. Jak bylo zmíněno výše, pro potřeby energetické aplikace obvykle postačují pole elektrostatické, elektrické proudové, teplotní, magnetické a pole proudícího média. Konkrétní volba použitého software

pak záleží na preferencích schopnostech konkrétního modeláře.

Z tabulky 2 zmíníme některé. Pravděpodobně nejsilnějším nástrojem v současné době je ANSYS. Díky historickému vývoji tohoto systému v dnešní době zahrnuje veškeré multifyzikální aplikace. Z původně strojního zaměření došlo k pohlcení konkurenčních systémů a momentálně tak lze díky jednotlivým součástem řešit sruzené úlohy mnoha polí. Díky tomu, že ANSYS tvoří systém mnoha dílčích programů, je možné využít jiných řešičů v dílčích součástech. Tak je možné provést

Název	Popis
COMSOL Multiphysics	Multifyzikální nástroj využívající výpočty FEM
Agros2D	Multiplatformní open source aplikace pro řešení fyz. polí (hp-FEM)
CALFEM	Interaktivní nástroj zaměřený na výukové účely FEM výpočtů (Computer Aided Learning of Finite Element Method)
ANSYS	Kompletní balík pro CAE analýzu (Computer Aided Engineering)
Quickfield	Programový balík pro simulaci a analýzu 2D a částečně 3D fyzikálních úloh založených na elektromagnetickém či teplotním poli či na mechanické bázi
Opera	Numerické řešení problémů z oblasti elektrotechniky, zejména elektrických strojů
FEATFLOW	Systém pro numerické řešení Navier-Stokesových rovnic pro nestlačitelné proudění ve 2D a 3D
Hermes Project	Modulární C/C++ knihovna pro prostorové a časoprostorové řešiče hp-FEM
Elmer	Open source multifyzikální simulační software
DUNE	Distributed and Unified Numerics Environment

Tabulka 2 Přehled nejužívanějších výpočetních FEA nástrojů

Název	Popis
MATLAB & Simulink	Multiplatformní výpočetní systém s možností využití doplňkového balíčku pro energetiku SimPowerSystems.
Dynast	Nástroj pro řešení dynamických soustav různého fyzikálního charakteru (el. obvody, hydraulika, mechanika, ...)
EMTP-ATP	Rozšířený systém pro energetiku, zkratka z Electro-Magnetic Transient Program – Alternative Transient Phenomena
PSPICE	Dřívější OrCAD, se významným potenciálem pro aplikace kombinované s elektronikou
LTSpice	Rychlá analýza lineárních elektrických obvodů

Tabulka 3 Přehled nejužívanějších výpočetních nástrojů pro analýzu obvodů

coupling mezi elektrickým polem (vypočítaným pomocí FEM) a polem proudícího média (vypočítaným pomocí FVM). Právě možnost využití FVM tvoří podstatnou výhodu, protože se jedná o robustní výpočet, kterým bezpečně dojde k výpočtu i silně nestacionárních úloh jako je právě třeba proudění média ve zřehací komoře. Jedná se o komerční systém založený a vyvíjený ve Spojených státech.

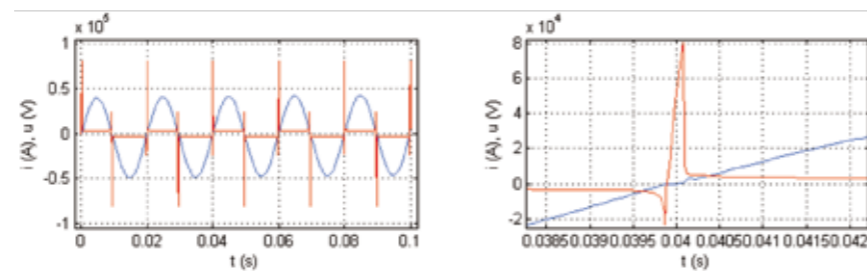
Dalším ze silných zástupců v dané tabulce je COMSOL Multiphysics. Jedná se o další multifyzikální systém, jehož velkou výhodou je to, že veškeré možnosti fyzikálních polí jsou integrovány do jednoho GUI. Díky tomu je obsluha a zpracování modelu sdružených úloh jednodušší pro jakýkoliv typ fyzikálního rozhraní. COMSOL Multiphysics také disponuje širokou škálou přednastavených modelů, materiálů, prostředí apod. Jde rovněž o komerční systém s vývojem ve Švédsku.

Dalším ze zajímavých nástrojů je Agros2D. Jak sám název napovídá, slouží zejména k řešení dvoudimenzionálních problémů v oblasti elektrického a magnetického pole na základě knihovny Hermes. Systém využívá řešiče hp-FEM, což je mírně upravená metoda FEM, která mění velikost prvku (h) a stupeň polynomu (p). Více viz [5]. Jedná se o open source software, kte-

lý je vyvíjen na Západočeské univerzitě v Plzni.

Obdobná kritéria platí i pro obvodovou analýzu energetických aplikací. Zde však probíhá výpočet pouze obyčejných diferenciálních rovnic, což je oproti parciálním diferenciálním rovnicím značná výhoda. Tabulka 3 ukazuje SW nástroje užívané pro obvodovou analýzu.

Při modelování obvodového modelování některé nástroje umožňují kombinovat definici problému jak ve formě elektrického obvodu, tak i parametricky rozšiřovat o další závislosti či externí vlivy (např. hysteretní křivka, parametrická závislost elektrických veličin na neelektrických apod.). Samotné řešiče výše zmíněných nástrojů pak obvykle k řešení obyčejných diferenciálních rovnic používají standardní metody



Obrázek 3 Průběh proudu a napětí na obloku - simulovaný případ, celkový průběh a detail v okolí proudové nuly

řešení ODE23, ODE45 či jejich další specifické variace.

5. PŘÍKLADY MODELOVÁNÍ PROBLÉMŮ VE SPÍNACÍ TECHNICE

5.1. OBVODOVÉ MODELOVÁNÍ PŮSOBNÍ OBLOKU

Typickým příkladem obvodového modelování ve spínací technice může být zahrnutí působení oblouku na vnější obvod. Pro tyto případy byl zpracován model v nástroji MATLAB – Simulink, jež popisuje dynamické chování vodivosti oblouku podle již zmíněných teorií Cassieho a Mayra dle následujících rovnic.

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

$$Mayr: \frac{1}{G} \frac{dG(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left[\frac{u_a(t) \cdot i_a(t)}{P_d} - 1 \right]$$

Tyto rovnice byly reprezentovány v blokovém schématu v nativním prostředí Simulink a řešení (výsledné průběhy) je uvedeno na obrázku 3.

Na obrázku 3 jsou dobře patrné zapalovací a zřehací špičky, jakož i působení oblouku v okolí proudové nuly, kdy po určité době neprochází obloukem žádný proud, strmě roste napětí, až dojde k opětovnému zapálení oblouku, po čemž napětí klesne na nižší, téměř konstantní hodnotu.

5.2. NAMÁHÁNÍ ZHÁŠECÍ KOMORY – ELEKTROSTATIKA A PROUDĚNÍ

Následující příklad ukazuje výsledek z řešení elektrostatického namáhání zřehací komory vypínače. Uvedený příklad odpovídá zdvíhu 70mm a napětí mezi kontakty 69kV.

Uvedený příklad byl zpracován v systému COMSOL Multiphysics. Je zřejmé, že k nejvyšší intenzitě el. pole dochází v okolí kontaktů, kde je díky zadaným potenciálům a velkým změnám geometrie vysoká hodnota gradientu. Z obrázku 4 je též možno pozorovat velké možnosti post-processingu, které COMSOL Multiphysics nabízí.

Na obrázcích 5 a 6 je uvedena táž zřehací komora, kde tentokrát bylo řešeno pole proudícího plynu SF6. Díky složité geometrii, nelinearitě úlohy a velkým tlakovým roz-

dílům vykazoval výpočet v systému COMSOL Multiphysics divergenci a výsledné numerické řešení bylo evidentně nesprávné. To je jednou z nevýhod tohoto systému – i přes možnost řešit mnohé modely, včetně CFD (computational fluid dynamics), některým aplikacím výpočty fluidního pole metoda FEM nestačí a je nutné zvolit metodu konečných objemů (FVM).

Toto bylo provedeno v systému ANSYS, kde již výpočet konvergoval a pro daný případ jsme získali následující výsledky. Obrázek 5 znázorňuje rychlost proudění plynu v komoře vypínače, kdy tlak plynu na vstupu dosahoval 900kPa. Tato hodnota typově odpovídá tlaku plynu v komoře při vypínání malých induktivních či kapacitních proudů.

V tomtéž modelu jsme díky obdobným možnostem post-processingu získali rozložení hustoty, což je uvedeno na obrázku 6.

6. ZÁVĚR

Současné softwarové produkty nabízejí v oboru modelování elektrotechnických jevů širokou škálu možností. Jak bylo představeno v příspěvku, problematika modelování je poměrně složitým procesem, který je poplatný zejména reálné aplikaci, použitému výpočetnímu nástroji, tak i schopnostem konkrétního pracovníka. Je patrné, že zpracování modelu by mělo být jen jakýmsi doplňkem při návrhu reálného zařízení, či ověření funkčnosti dílčí inovace. Modely, a výsledky z nich získané, tvoří jen jeden z mnoha podpůrných pilířů, sám o sobě však není dostatečný a je nutné do výsledku vždy reflektovat obsah, rozsah a nastavení daného modelu tak, aby bylo bezpečně jasné, jaké reálné situace model znázorňuje.

Je však vhodné zmínit, že v mnoha případech současné softwarové nástroje poskytují velkou úlevu a snadnější, rychlejší a ekonomicky efektivnější proces vývoje, návrhu a ověření funkčnosti dané aplikace, jsou tak cenným pomocníkem.

Využití modelovacích nástrojů pro simulace ve spínací technice je z důvodu samotného charakteru aplikace poměrně obtížné (silně sdružená úloha mnoha fyzikálních polí). Avšak při dostatečném respektování reálné situace, propojení obvodového a polářského pohledu a plnění základních povinností a postupů modelování, lze tímto způsobem získat cenná a mnohdy nereálně získatelná data.

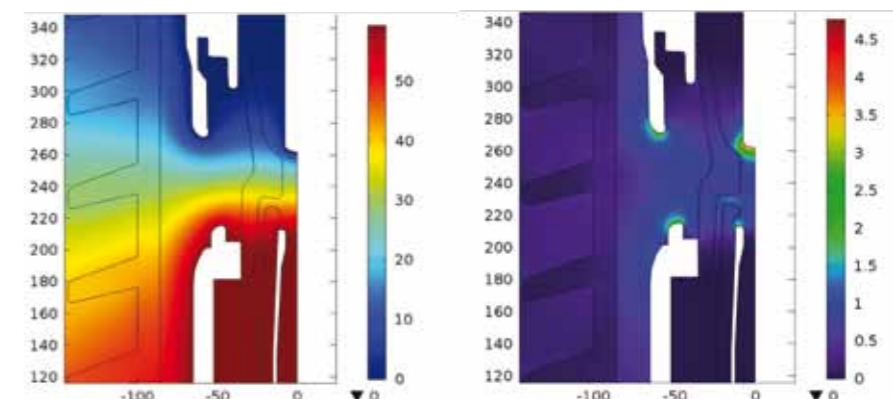
7. LITERATURA

- [1] MAYER, D. Aplikovaný elektromagnetismus, 2. vydání, Nakladatelství KOPP, ISBN: 978-80-7232-436-1, České Budějovice, 2012.
- [2] MANN, H., ŠEVČENKO, M. Snadné počítačové modelování dynamických soustav, Praha, 2008.
- [3] NOHÁČ, K. Podklady k předmětu KEE/MS, Plzeň, 2014.
- [4] Internetová encyklopedie Wikipedia, List of finite element software packages, dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_finite_element_software_packages, [cit. 20-9-2016].
- [5] Metoda hp-FEM, dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hp-FEM>, [cit. 26-9-2016].

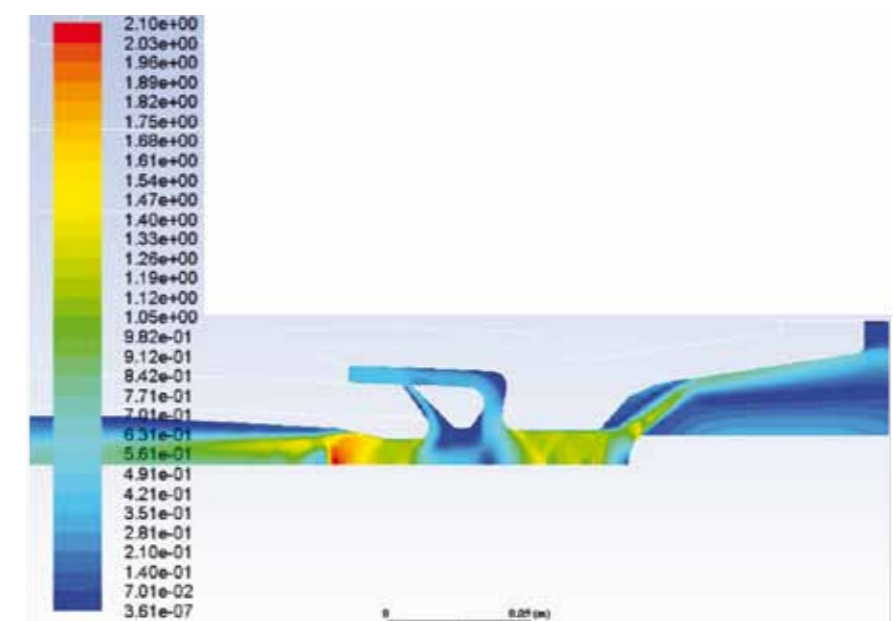
[6] NAKANISHI, K. Switching phenomena in High-voltage circuit breakers, Nakladatelství Marcel Dekker, ISBN: 0-8247-8543-6, New York, 1991

8. PODĚKOVÁNÍ

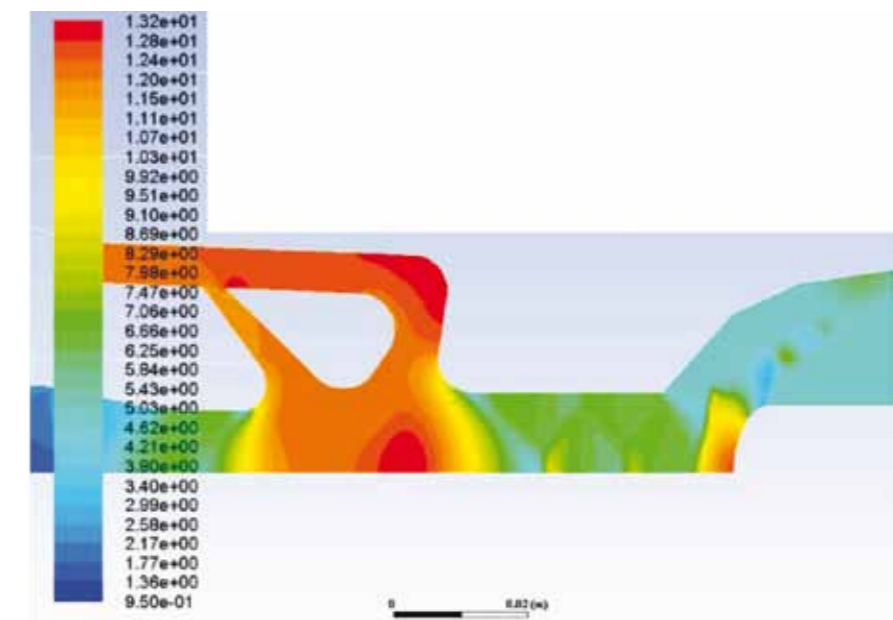
Téma a prezentace výsledků je podporována z projektu TA04020956 (TA ČR) a projektu Západočeské univerzity v Plzni SGS-2015-031.



Obrázek 4 Rozložení elektrického potenciálu (stupnice v kV) a intenzity el. pole (stupnice v kV/mm) ve zřehací komoře vypínače SF6



Obrázek 5 Rychlostní pole (Machovo číslo) v komoře vypínače při tlaku 900kPa na vstupu



Obrázek 6 Rozložení hustoty v komoře vypínače v okolí stagnačního bodu při tlaku 900kPa na vstupu