

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky

Doc. Ing. Libor Dědek, CSc.

**POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ
ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ**

Současný stav, trendy vývoje a výuky

COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETISM

**Up to date state, future
development and education**

INAUGURAČNÍ PŘEDNÁŠKA KE JMENOVÁNÍ PROFESOREM



Brno 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

Počítačové modely, elektromagnetismus, základní rovnice, sdružené úlohy, optimalizace, výuka modelování

KEY WORDS

Electromagnetism, computational models, basic equations, coupled problems, optimisation, education.

Obsah přednášky

Úvod

Základní vztahy z elektromagnetického pole

Stručný historický vývoj numerických metod

Současný stav a perspektivy oboru

Úloha návrhářů a programátorů

Další rozvoj oboru

Problematika výuky modelování polí

Příspěvek autora k rozvoji oboru

Závěr

Libor Dědek se narodil v r. 1939 v Jilemnici. V r. 1958 absolvoval Střední průmyslovou školu elektrotechnickou v Šumperku a v r. 1963 Elektrotechnickou fakultu VUT v Brně, obor Výroba, rozvod a využití elektrické energie.

Po ukončení studia v r. 1963 nastoupil na Katedru teoretické a experimentální elektrotechniky nejprve jako asistent a od r. 1966 jako odborný asistent. V r. 1974 získal vědeckou hodnost CSc. v oboru Teoretická elektrotechnika na základě obhajoby práce „Teorie indukčního snímače s Hallovým článkem“. V r. 1979 obhájil habilitační práci „Příspěvek k problematice měření shluků hydridů v zirkoniových povlakových trubičkách.“

V r. 1980 absolvoval dvouměsíční studijní pobyt na univerzitě v Liverpoolu v Anglii. V letech 1981 – 84 přednášel matematiku, elektroniku a vedl diplomové práce na Military Technical College v Bagdáď v Iráku. Od r. 1984 dosud je zaměstnán na Katedře (nyní Ústavu) teoretické a experimentální elektrotechniky FEI VUT v Brně.

V oblasti pedagogického působení zavedl v základním studiu předměty Elektromagnetismus, Inženýrské výpočty v C, Modelování polí v elektrotechnických zařízeních, v bakalářském studiu předmět Užitý elektromagnetismus a dále 3 předměty v doktorandském studiu.

V r. 1992 založil a do r. 2000 vedl „Laboratoř modelování a optimalizace polí v elektromechanických systémech“, která vyřešila více než 40 úkolů, zadaných převážně ABB EJV Brno.

Je spoluřešitelem grantu GAČR a byl řešitelem několika grantů VUT. Od r. 1985 vede vývoj programových systémů MEP a MMAP k modelování elektromagnetických polí, které jsou v současnosti používány ve výuce na všech elektrotechnických fakultách v ČR a na Slovensku.

Autor přednášky je členem americké společnosti IEEE a její Československé sekce, celosvětové organizace International Compumag Society (ICS), britské Literati club a česko-slovenské Společnosti pro radiotechnické inženýrství.

Úvod

Modelování elektromagnetických polí pomocí počítačů zaznamenalo v poslední dekádě význačné rozšíření a rychle se stává jedním z důležitých nástrojů, které mají k dispozici konstruktéři a návrháři různých elektrotechnických zařízení a fyzikálních aparatur. V této době byla vydána celá řada knih, zabývající se modelováním nebo častěji jeho dílčími částmi. Je proto důležité zachovat si nadhled nad celou řadou metod, počínaje problematikou generace optimálních časoprostorových sítí přes vlastní matematickou a fyzikální část až po vhodné zobrazení výsledků.

Nedávné pokroky v počítačovém modelování zahrnují samočinnou generaci sítí včetně adaptivních metod řešení, zajišťujících co nejvyšší přesnost získaných veličin pole.

K vlastnímu matematickému řešení rovnic elektromagnetického pole byla vyvinuta řada numerických metod, které jsou neustále zdokonalovány. Důvodem značného počtu metod je sama složitost Maxwellových rovnic a jejich rozpad na jednodušší soustavy, umožňující často použít efektivnější postupy. Dále je třeba připomenout nesouměřitelnost některých praktických problémů, kdy např. jeden z rozměrů je velmi malý a diskretizace rovnic pole vede na příliš velký počet rovnic. Další třídu tvoří úlohy propojení oblastí pole s částmi popsanými rovnicemi elektrických obvodů nebo kombinované úlohy ve spojení s rovnicemi tepla nebo pružnosti a pevnosti. Přes neustálý vývoj všech metod, jak bylo konstatováno v panelové diskusi na poslední celosvětové konferenci COMPUMAG (Evian, Francie, červen 2001), zaostává oblast modelování za potřebami praxe a v mnoha případech při vývoji zařízení s novými technologiemi je stále třeba upřednostnit experiment před modelem.

Základní vztahy z elektromagnetického pole

Základní experimentálně měřené veličiny elektromagnetického pole jsou v tabulce 1.

Tab. 1. Přehled integrálních veličin pole

Název	značka	název jednotky SI	zkratka
elektrický náboj	Q	coulomb	C
elektrické napětí	U	volt	V
magnetické napětí	U_m	ampér	A
elektrický proud	I	ampér	A
elektrický indukční tok	Ψ	coulomb	C
magnetický indukční tok	Φ	weber	Wb

Základní lokální veličiny pole jsou v tabulce 2.

Tab. 2. Základní skalární a vektorové funkce pole

Veličina	značka	SI	Veličina	značka	SI
objemová hustota náboje	ρ	C/m ³	hustota proudu	\mathbf{J}	A/m ²
intenzita elektrického pole	\mathbf{E}	V/m	elektrická indukce	\mathbf{D}	C/m ²
intenzita magnetického pole	\mathbf{H}	A/m	magnetická indukce	\mathbf{B}	T

Základní vztahy mezi veličinami pole vyjadřují Maxwellovy rovnice. V integrálním tvaru se obvykle zapisují

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1a, b)$$

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q, \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (2a, b)$$

Rovnice doplňují materiálové vztahy (\mathbf{M} , μ_0 , ε , γ , jsou magnetizace, permeabilita vakua, permitivita a konduktivita)

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}. \quad (3a, b, c)$$

Diferenciální tvar Maxwellových rovnic je

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{I}), \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{II}),$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (\text{III}), \quad \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (\text{IV}).$$

Rovnice v diferenciálním tvaru neplatí na rozhraní dvou prostředí se skokovou změnou materiálových parametrů. Zde se nahrazují podmínkami spojitosti tečných a normálových složek vektorů pole

$$\mathbf{E}_{t1} - \mathbf{E}_{t2} = 0, \quad \mathbf{H}_{t1} - \mathbf{H}_{t2} = 0, \quad (4a, b)$$

$$\mathbf{D}_{n1} - \mathbf{D}_{n2} = \sigma, \quad \mathbf{B}_{n1} - \mathbf{B}_{n2} = 0, \quad \mathbf{J}_{n1} - \mathbf{J}_{n2} = 0, \quad (4c, d)$$

kde σ je hustota volného plošného náboje v rozhraní. Soustavu je třeba doplnit vhodnými počátečními a okrajovými podmínkami. Úplnou soustavu (I) – (IV) použijeme při výpočtu úloh vyzařování, šíření a odrazu elektromagnetických vln.

Podle počtu proměnných rozlišujeme úlohy jedno-, dvou- a trojrozměrné, zkráceně 1D, 2D, 3D (D -dimense). Podle časové závislosti lze obecný nestacionární problém elektromagnetického pole zjednodušit na problém statický, stacionární, kvazistatický a kvazistacionární.

Analytické řešení konkrétní úlohy dokážeme nalézt jen pro některé 1D a 2D úlohy. Složitější problémy se řeší výhradně numericky. Avšak ani s použitím nejmodernější výpočetní techniky nedokážeme dosud nalézt dostatečně přesné řešení většiny problémů inženýrské praxe. Všechny metody řešení jsou závislé na zjednodušení obecné soustavy, a proto si zjednodušené skupiny rovnic uvedme.

Pole statické

je pole, ve kterém jsou náboje v klidu a proudy nulové. Vektory pole jsou v čase konstantní a derivace podle času nulové. Maxwellovy rovnice se pak rozpadnou na dvě nezávislé soustavy

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad \text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (5a, b, c)$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = 0, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_0. \quad (6a, b, c)$$

Soustava (5) popisuje pole elektrostatické, jehož zdrojem jsou náboje v klidu.

Soustava (6) popisuje pole magnetostatické, jehož zdroje jsou permanentní magnety s magnetizací \mathbf{M}_0 a část obvodu tvoří magneticky měkký materiál s permeabilitou μ . Oba typy polí jsou vírové a lze je modelovat pomocí skalárních potenciálů.

Pole stacionární

je pole, ve kterém se náboje pohybují konstantní rychlostí, tj. pole stejnosměrných proudů. Soustava (I) až (IV) se opět rozdělí na dvě. Magnetické pole stacionární je popsáno rovnicemi

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}_0. \quad (7a, b, c)$$

Zdrojem magnetického pole jsou stejnosměrné proudy ve vodičích a permanentní magnety. Na rozdíl od předchozích polí je toto pole vírové a počítá se jak pomocí skalárního, tak i vektorového magnetického potenciálu.

Protože platí $\operatorname{div} \mathbf{J} = \operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{H} \equiv 0$, vznikne další soustava

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \quad (8a, b, c)$$

která popisuje rozložení hustoty ustálených proudů ve vodivém prostředí. Pole je popsáno formálně stejnými rovnicemi, jako pole elektrostatické a můžeme je modelovat i pomocí stejných programů.

Pole kvazistacionární

Při modelování časově proměnného pole ve vodičích lze zanedbat posuvné proudy, ale je třeba respektovat proudy vodivé, spojené s indukčním zákonem a pohybem vodiče rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli. V dobrém vodiči již malá hodnota \mathbf{E} způsobí značné proudy. Naproti tomu jsou ve vodiči zanedbatelné proudy posuvné. Takto počítáme pole a ztráty ve všech vodičích včetně vlnovodů, vlastnosti indukčních snímačů, kovová stínění v časově proměnných polích a problémy spojené s elektromagnetickou kompatibilitou. Pole ve vodiči je popsáno rovnicemi

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{div} \mathbf{J} &= 0, & \mathbf{J} &= \gamma \mathbf{E}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, & \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}. \end{aligned} \quad (9)$$

Pole kvazistatické

Při modelování časově proměnných polí nízkých kmitočtů ve slabě vodivém prostředí (znečištěný vzduch, zdegradovaná izolace dielektrik, znečištěný povrch izolátoru) jsou malé posuvné a vodivé proudy stejného řádu. Vírové elektrické pole od těchto proudů lze pak zanedbat ($\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \cong 0$) a pro modelování elektrického pole použijeme namísto rovnic (8) soustavu

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{J}_{\text{tot}} = 0, \quad \mathbf{J}_{\text{tot}} = \gamma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (10a, b, c)$$

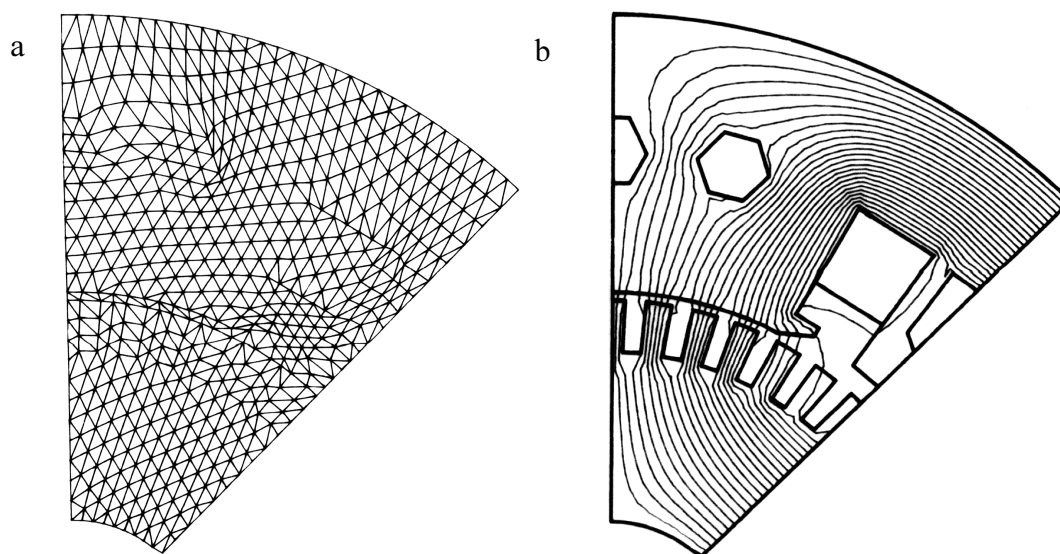
Zde druhý a třetí výraz představují rovnici kontinuity celkového proudu \mathbf{J}_{tot} . S výpočtem polí na základě těchto rovnic se setkáme např. ve speciálních programech pro modelování polí znečištěných izolátorů. K výpočtu se používá skalární potenciál, proměnný v čase.

Je na místě poznamenat, že diferenciální tvar rovnic (I) až (IV) a (5) až (10) lze zpravidla převést pomocí Greenovy věty a jinými úpravami na *rovnice integrální*, které v tomto přehledu pro jejich velikou rozmanitost neuvádím. Jen např. soustava (5) lze vyjádřit

pomocí uvedené věty a jednoduchých manipulací pěti různými soustavami integrálních rovnic.

Stručný historický vývoj numerických metod

Počátek numerického výpočtu elektromagnetických polí spadá do poloviny 60. let, kdy byla shledána potřeba nových výkonných výpočetních metod, a to zejména při konstrukci velmi nákladných zařízení, jako jsou výkonné generátory nebo urychlovače částic pro fyzikální výzkum. Do této doby převažovaly metody založené na analytickém řešení rovnic pole nebo metody experimentálních měření dílčích částí (např. nelineární reluktance v magnetických obvodech). Požadavek, aby již prototyp nákladného zařízení byl plně funkční, vedl ke vzniku výzkumných oddělení u výrobců a návrhářů těchto zařízení, např. u General Electric v USA, v Ruthefordově ústavu ve Velké Británii, nebo při vysokých školách. Tyto instituce měly na svoji dobu nejvýkonnější počítače a vyvíjely programy na bázi metody konečných diferencí (MKD) a metody konečných prvků (MKP), založených na numerickém řešení diferenciálních rovnic polí. Výhodou těchto metod byla možnost modelovat nelineární úlohy. Souběžně byly rozvíjeny numerické metody řešení integrálních rovnic pole s řadou variant – v elektrotechnice to byla metoda hraničních prvků (MHP), metoda povrchových nábojů (SCM) a metoda simulovaných nábojů pro výpočet statických polí a momentová metoda (MoM) k návrhu antén. Tyto metody byly vhodné k řešení lineárních úloh. Většinou byly převzaty z jiných oblastí inženýrské činnosti, zabývajících se návrhem nákladných zařízení (strojírenství – letecký průmysl, stavitelství). S růstem výkonu počítačů po r. 1970 byla pro nelineární úlohy převážně rozvíjena MKP, kdežto MHP byla používána v elektrostatice. MHP vyžaduje v lineárním homogenním prostředí řešení hustých nesymetrických rovnic, avšak jen pro hledané veličiny na plochách nespojitosti a tedy pro redukovaný počet neznámých, oproti MKP, která vyžaduje prostorovou síť. V nelineárním prostředí se výhoda MHP ztrácí. Po celé desetiletí byla MKP považována za nástroj výzkumu, i když dosahované výsledky naznačovaly možnost efektivního návrhu, snížení ztrát a tím i nákladů. Jako příklad z té doby je na obr. 1 síť a siločáry



Obr. 1 Síť konečných prvků a siločáry pole v části motoru

vektoru \mathbf{B} 2D pole v části motoru, získané pomocí MKP programu Roger-Magic, vyvinutým ve VUES v Brně skupinou prof. Melkese.

Na počátku osmdesátých let byly některé varianty MKP zavedeny z výzkumných oddělení přímo do konstrukčních kanceláří jako součást návrhu zařízení. Problémem se ukázalo, že jednak návrháři očekávali okamžité řešení složitých úloh na málo výkonných počítačích s minimální potřebou paměti, jednak byli zvyklí pracovat s obvodovými veličinami, jako je napětí, tok, ztráty, a důležité numericky počítané veličiny pole, jako např. vektorový potenciál a teorie pole byly (a u nás doposud jsou) málo známými pojmy. Na vysokých školách s elektrotechnickým zaměřením se – až na výjimky – numerické metody nepřednášely. Dokazuje to i neexistence učebnic nebo monografií z této doby. Byla však věnována veliká pozornost ve zkrácení doby potřebné pro tvorbu modelu a výpočet generace sítí, grafické zobrazení výsledků. Byla navržena řada alternativních řešení, 2D úlohy se staly rutinními a s rostoucím výkonem počítačů se počaly vyvíjet 3D úlohy spolu s možností modelování přechodných dějů. Byla např. zavedena povrchová impedance pro výpočet ztrát v krytech transformátorů nebo v laminovaných částech strojů, model tenké kovové vrstvy v průchodkách aj. Všechna tato vylepšení spolu se zdokonalením plnoautomatických generátorů sítí a s růstem výkonu počítačů a při poklesu ceny paměti umožnila konstruktérům využít numerické metody modelování.

Ve vysokofrekvenční technice nedošlo k širokému použití MKP do počátku devadesátých let. Důvodem byla jednak potřeba řešit při vyzařování antén tzv. otevřené úlohy a v uzavřených úlohách (rezonátory, vlnovody) byly pomocí klasických prvků s vektory pole v uzlech sítě získávány často chybné výsledky (falešné vidy). Ke konci dekády byla rozpracována teorie „hranových prvků“ (edge elements - Bossavit) při modelování vírových elektromagnetických polí, popsanych rovnicí s operátorem $rot \ v \ rot$. Její řešení pomocí vektorů definovaných v uzlech sítě nedávalo uspokojivé výsledky. Dále byla zdokonalena momentová metoda a byly vytvořeny základy pro vysoce účinnou metodu konečných diferencí v časové oblasti (finite difference in time domain – FDTD).

Je ironií vývoje, že neškolení konstruktéři a návrháři používali často modelování polí ke zkoumání zařízení, které již bylo vyrobeno. To potvrzuje i autorova osobní zkušenost, když získal dlouhodobou podporu vývoje programových systémů z prostředků jisté podnikové zkušebny. V lepším případě byl proveden návrh prototypu na základě zkušenosti, předpovědělo se jeho chování pomocí zpravidla jednoduchého počítačového modelu a případně následovala opakovaná počítačová analýza heuristicky zlepšující parametry. To je pracná metoda „pokusu a omylu“, ke které se vrátím v oddíle o moderní optimalizaci.

Současný stav a perspektivy oboru

V poslední dekádě bylo dosaženo řady úspěchů, dokumentovaných v literatuře. Nejdůležitější výsledky jsou publikovány na řadě konferencí, z nichž nejvýznamnější jsou celosvětové COMPUMAG, a IEEE CEFC (Conference on Electromagnetic Field Computation), pořádaných v uvedeném pořadí pravidelně v liché a v sudé roky. Vybrané články z těchto celosvětových setkání výzkumníků i uživatelů numerických metod jsou publikovány v [1]. Na těchto konferencích nelze publikovat výsledky získané pomocí komerčních programů. Vlastní testy komerčních i experimentálních programů na předem definovaných problémech se porovnávají na tzv. TEAM Workshops (Testing Electromagnetic Analysis Methods), které tvoří samostatnou část významných konferencí a symposií. Práce zabývající se teorií metod jsou publikovány v řadě časopisů zaměřených

na numerickou matematiku. Některé nejnovější výsledky z oboru byly publikovány i knižně se zaměřením na jednotlivé metody a oblasti použití (např. [2] až [8]). Podrobnější studium literatury ukazuje, že oblast aplikace numerických metod v elektromagnetismu se stala již tak rozsáhlou, že výsledky nelze shrnout do jedné publikace.

Vývoj samotných metod numerického výpočtu vpředu uvedených rovnic a jejich integrálních protějšků není dosud ukončen. Uveďme si pro úplnost přehled hlavních metod v současnosti používaných, z nichž každá prokázala své přednosti a nedostatky.

Numerické metody aplikované na diferenciální rovnice

- Metoda konečných prvků (FEM – MKP)
- Metoda konečných diferencí (FDM – MKD)
- Metoda konečných diferencí v časové oblasti (FDTD)
- Metoda konečných objemů (FVM – MKV)

Numerické metody aplikované na integrální rovnice

- Metoda hraničních prvků (BEM – MHP)
- Momentová metoda (MoM)
- Metoda povrchových nábojů (SCM)
- Metoda simulovaných nábojů (CSM)

Tento výčet není úplný, neboť existují účinné metody vycházející i z integrálního tvaru Maxwellových rovnic - např. metoda konečných integrálů (FIT) nebo z kombinace numerické metody s Fourierovou nebo Laplaceovou transformací v časové oblasti.

Jednotlivé výše uvedené metody se spolu rovněž vzájemně kombinují. Časté je spojení MKP – MHP, při kterém se počítá prudce se měnící pole v nelineární oblasti pomocí MKP a jinde pomocí MHP. Modelují se i sdružené úlohy s jinými typy polí.

Současné třídění problematiky modelování elektromagnetických polí je podle uspořádání na výše uvedených konferencích děleno do následujících oblastí:

1. Statická pole
2. Kvazistatická pole
3. Stacionární pole
4. Kvazistacionární pole
5. Šíření elektromagnetických vln
6. Elektromagnetická kompatibilita
7. Optimalizační úlohy a zobecněný návrh elektromagnetických zařízení
8. Modelování vlastností materiálů
9. Sdružené úlohy
10. Numerické postupy
11. Elektromagnetická zařízení, aplikace

Zmíníme se stručně o současném stavu jednotlivých oblastí, přičemž větší pozornost věnujeme problematice zobecněného návrhu elektromagnetických zařízení. U výpočetních

metod pro stručnost uvádím výchozí diferenciální rovnice bez příslušných okrajových a počátečních podmínek, které bývají v řadě případů inženýrské praxe velmi složité.

Statická pole

Tato oblast je rozvíjena nejdéle a byla převzata z jiných oblastí, popsaných formálně stejnými rovnicemi. Diskretizují se převážně diferenciální rovnice pro potenciál Φ tvaru

$$\operatorname{div} \kappa \operatorname{grad} \Phi = f, \quad (11)$$

(κ je lineární nebo nelineární materiálová konstanta, f je zdroj pole), nebo integrální rovnice. Nejčastěji používaná metoda je MKP pro nelineární úlohy – modelování elektrostatických, a proudových polí. MHP, nebo její varianty SCM a CSM se používají pro lineární úlohy. CSM je vhodná k modelování nesouměřitelných úloh, jako jsou elektrická pole venkovních vedení. Protože úlohy nezávisí na čase, jsou relativně nenáročné na výpočetní techniku. Současný vývoj se soustřeďuje na pole v nelineárních magnetických obvodech s permanentními magnety, kde je nutné implementovat vhodné modely hystereze a na zařízení vysokého napětí, kde je třeba vyvinout a implementovat vhodné fyzikální modely k výpočtu vývoje koróny a přeskočků.

Kvazistatická pole

Stejně jako předchozí, je toto pole nevírové. Soustavu (10) lze proto přepsat na

$$\operatorname{div} \left(\gamma \operatorname{grad} \Phi(t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{grad} \Phi(t) \right) = 0, \quad (12)$$

K modelování polí se používá MKP a MHP. Materiálové parametry se zavádějí nejen v objemech, ale i na plochách (tenké rezistivní vrstvy). Pomocí MKP lze modelovat i nelineární rezistory (chrániče přepětí).

Stacionární pole

Rovnice (8), popisující pole ustálených proudů, lze řešit v důsledku formální podobnosti s (5) programy pro pole elektrostatické. Nesouměřitelné úlohy, jako jsou např. složité zemnicí soustavy, se modelují pomocí CSM.

Soustava (7), představující stacionární magnetické pole, obvykle popisuje úlohu, sestávající z nemagnetických cívek (zdrojů pole), z nelineární oblasti (obvodu se železem) a z nemagnetického prostředí. V důsledku přítomnosti nelinearit se používají výhradně varianty MKP.

Protože pole mimo oblast cívky je nevírové, lze je počítat pomocí skalárního magnetického potenciálu. Toto nevírové pole se kombinuje s polem cívky, vyjádřeným zpravidla pomocí Biot-Savartova zákona. Bylo vyvinuto a prakticky aplikováno několik metod, využívajících skalární potenciál.

Soustava (7) se také modeluje pomocí vektorového potenciálu \mathbf{A} , pro který platí $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$. Diskretizuje se rovnice s operátorem $\operatorname{rot} \operatorname{rot}$, typickým pro elektromagnetické pole

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J} + \operatorname{rot} \mu^{-1} \mu_0 \mathbf{M}, \quad (13)$$

kde \mathbf{M} představuje vliv permanentních magnetů.

V případě 2D modelů (pole v elektromotoru) má vektorový potenciál jen jednu složku, operátor $\operatorname{rot} \operatorname{rot}$ lze nahradit operátorem $\operatorname{div} \operatorname{grad}$ a model je analogický s modelem statickým. Modely zahrnují zpravidla nelineární materiály a v poslední době je úspěšně řešen i problém hystereze.

Při modelování 3D magnetických polí vektorovým potenciálem podle (13) se používají dva typy konečných prvků, a to prvky s vektory definovanými v uzlech sítě nebo vektory na hranách prvků („edge elements“). Diskuse o výhodách a nevýhodách obou typů prvků a o vhodnosti kalibrace A pokračuje do současnosti (viz např. [9]).

Kvazistacionární pole

Pole je popsáno soustavou (9). Počítá se současně pole magnetické i elektrické a to opět pomocí MKP nebo v případě lineárních prostředí i pomocí integrálních rovnic. Pro modely zahrnující nelineární prostředí se používají různé varianty MKP. Nejčastěji se využívá současně skalární elektrický a vektorový magnetický potenciál ($A - \phi$ metoda) nebo vektorový elektrický potenciál T , definovaný vztahem

$$\text{rot } T = J \quad (14)$$

a skalární magnetický potenciál Ω ($T - \Omega$ metoda). Modely se zjednoduší pro harmonický ustálený stav a lineární prostředí. Aplikace metod jsou uvedeny vpředu. Tyto úlohy jsou zpravidla spojeny s elektrickými obvody (připojení cívek ke zdrojům napětí) a vrátíme se k nim v oddíle *Sdružené úlohy*.

Šíření elektromagnetických vln

Tato oblast zahrnuje úlohy vyzařování, šíření a odrazu elektromagnetických vln, popsaných soustavou (I) až (IV). Výběr modelu se liší, stejně jako v předchozím odstavci, v závislosti na tom, je-li úloha lineární nebo nelineární a dále jde-li o harmonický ustálený stav nebo přechodný děj. MKP se prosazuje v této oblasti od počátku devadesátých let se zavedením hranových prvků. Využití MKP pro úlohy vyzařování a difrakce (otevřené úlohy) vyžádalo zavést zvláštní absorpční (ABS) nebo přizpůsobovací (PML) vrstvy, které umožňují modelovat neomezené šíření vln. Z integrálních metod se v lineárním prostředí stále využívá momentová metoda. Velkého rozšíření doznala metoda konečných diferencí v časové oblasti – FDTD, vhodná i pro modelování nelineárních úloh ([8]).

Elektromagnetická kompatibilita

Úkolem numerických metod je vytvářet pro návrháře vhodné modely, které ukáží, kudy vniká do navrhované soustavy elektronických obvodů rušivý signál, nebo naopak jakým způsobem soustava vyzařuje. Protože spektrum rušivých signálů je prakticky od stejnosměrných polí až po pole vysokofrekvenční nebo jsou uvažovány pulsy (úder blesku, jaderný výbuch, elektromagnetická bomba), používají se v této oblasti prakticky všechny metody modelování.

Optimalizační úlohy a zobecněný návrh elektromagnetických zařízení

Současná úroveň výpočetní techniky spolu s rozvojem metod pro modelování, expertních systémů a optimalizačních metod umožňuje vytvoření zobecněného konstrukčně – optimalizačního prostředí pro návrh elektromagnetických zařízení. Protože jde o oblast vysoce perspektivní, zmíníme se o ní podrobněji.

Inženýrský návrh nového zařízení představuje iterační proces vzájemné spolupráce, prováděný obvykle týmem zkušených pracovníků z několika oblastí vědy. Cílem procesu je vytvořit „produkt“, který jak svými fyzikálními parametry, tak i výkonem splňuje předem definovanou množinu požadavků. Jak bylo uvedeno výše, tradičně tento proces zahrnuje vývoj fyzického prototypu, což je časově náročný a drahý přístup. V řadě případů tento prototyp musí být i plně funkční (např. generátor 1000 MVA pro JE Temelín). Samotný návrh složitějšího systému může představovat převážnou část celkových nákladů, které určují cenu produktu. Redukce těchto nákladů byl a je zásadní úkol. První a nejpřirozenější je redukce nákladů simulací fyzického systému počítačovým modelem.

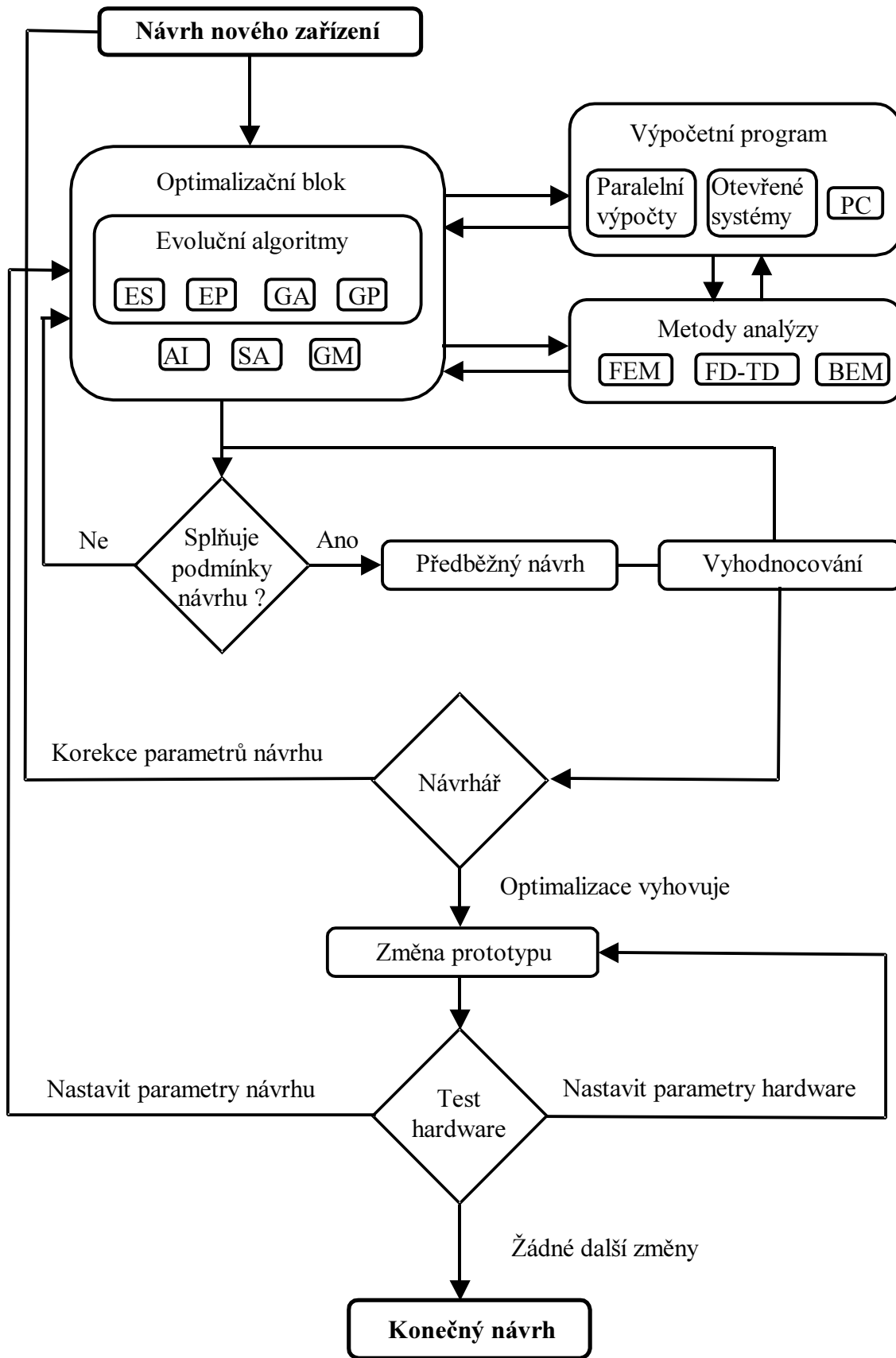
Každý pokrok v růstu výkonnosti a poklesu ceny výpočetní techniky dovolil stále realističtější simulaci fyzického systému. V současné době je reálné uvažovat o virtuální laboratoři – počítačovém prostředí, ve kterém prototyp může být konstruován a zkoušen se stejnou přesností, jako prototyp v reálné laboratoři, avšak při výrazném zkrácení času a snížení nákladů. Virtuální laboratoř je klíčový článek v procesu návrhu, neboť dovoluje návrh jednoho konkrétního modelu. Avšak ke splnění všech požadavků návrhu je třeba splnit všechny omezující podmínky, tj. využít optimalizační metody.

Při tradičním postupu návrhu je nutno uvažovat řadu aspektů od fyzického výkonu až k finančním a zákonným omezujícím podmínkám. Řadu z nich lze modelovat pomocí fyzikálních zákonů, ale vyžadují alternativní využití báze dosavadních znalostí. Navíc většina systémů nevyužívá pouze jedné oblasti fyziky, neboť existují vzájemné vazby např. mezi parametry elektromagnetickými, tepelnými a konstrukčními. Všechny vazby proto vyžadují vyhodnocení počítačových procesů a hardwarových struktur, potřebných k sestavení *virtuálního konstruktéra* – systém, který simuluje tým inženýrů s jejich zkušeností a odbornou znalostí. Tento systém by měl být uložen v distribuovaném výpočetním prostředí. Takové prostředí nemusí být vytvořeno na jednom místě, ale může spojovat vhodné nástroje uvnitř podniku nebo instituce i mezi institucemi. Pro přenos dat lze využít služeb Internetu a dalších sítí. Rovněž je třeba využít zkušenosti a odborných znalostí z předchozích řešení podobných zadání. Musí být specifikovány požadavky pro kvalitní propojení různých systémů, které dovolí jinak nezávislým zdrojům znalostí, jako jsou např. analýzy různých typů polí, expertní systémy, neuronové sítě aj., spolupracovat na základě příslušných protokolů.

V celém systému musí být zaručeno a uznáno postavení zkušených návrhářů, které ze systému nelze vyjmout. Ve většině úloh existuje několik „optimálních“ řešení. Které z nich je skutečně nejlepší, může záviset na činitelích mimo datovou bázi virtuálního návrháře. Inženýr případně může vést postup návrhu, zatímco virtuální návrhář určuje důsledky konkrétní volby. Soustava tak představuje symbiózu člověka a počítačového systému. K zajištění zpětné vazby je třeba správně prezentovat výsledky, a to nejen vizualizaci získanou modelováním polí, která je základem k pochopení činnosti, ale i vyjádření následků změn jednotlivých proměnných a omezujících podmínek.

V případě návrhu principiálně zcela nového zařízení by měl systém virtuální laboratoře vyjít ze základních zákonů fyziky a přibližné znalosti materiálových vlastností. Dosavadní zkušenosti ukazují, že tento postup je proveditelný, avšak vyžaduje vhodné počítačové vybavení.

Při optimalizování návrhu reálného elektromagnetického zařízení počet omezujících podmínek drasticky stoupá. Konstrukce elektromagnetického systému je často metodou „pokusu a omylu“, jak bylo uvedeno vpředu. Návrh nemusí vést k optimu, neboť závisí na zkušenosti návrháře. Je proto nutné simulovat soustavu numerickými metodami. Máme-li nalézt optimální návrh, musí numerická optimalizace dosáhnout správné optimum. Při aplikaci k praktickým problémům je třeba skloubit dohromady účinný preprocesing a postprocesing spolu s vysoce výkonným výpočetním systémem. Zobecněné optimalizační prostředí je znázorněno na obr. 2. Architektura systému pro navržené optimalizační prostředí se skládá z pěti hlavních navzájem vázaných bloků. Jsou to 1) soustava počítačů, 2) nástroje pro analýzu pole, 3) optimalizační blok, 4) blok, ve kterém rozhoduje a vstupuje do procesu návrhář, 5) blok pro změnu prototypu.



Obr. 2. Zobecněné schéma návrhu elektromagnetického zařízení

Jestliže návrh dosáhne uspokojivou úroveň optimalizace, je navržen jako prototyp. Pokud testy zjistí nedostatky v návrhu, nastaví návrhář nové parametry v hardwaru. Během několika pokusů systém stanoví přijatelnější výsledky. Potom mohou být nově nastavené parametry návrhu vloženy jako zcela nový návrh pro další optimalizaci. Cykly nastavení parametrů hardwaru a návrh opakované optimalizace mohou být opakovány, až je dosažen uspokojivý stav.

Optimalizační blok je „černá skříňka“, obsahující různé optimalizační metody. Volba mezi optimalizačními procedurami závisí na jejich předpokládané rychlosti nebo na kvalitě optimalizace. Součinnost mezi moduly výpočetního systému využívá dostupná výpočetní zařízení, zkušenosti a nástroje získané z předchozích aplikací.

Blok nástrojů pro analýzu, který nás zajímá nejvíce, obsahuje programové systémy pro analýzu pomocí MKP, MHP, FDTD a další dostupné programy, které jsou přístupné optimalizačnímu bloku k výpočtu cílové funkce. Tento blok rovněž zahrnuje informaci o různých metodách a jejich formulaci, vybavení pro pre- a postprocesing vstupních a výstupních dat, pro generaci sítí, adaptivní generaci sítí a software k propojení s ostatními bloky.

Optimalizační blok obsahuje optimalizační programy, využívající evoluční programování (EP) jako genetické algoritmy (GA) a genetické programování (GP). Rovněž obsahuje algoritmy využívající umělé inteligence (AI), jako neuronové sítě, simulované žíhání (SA), expertní systémy a adaptivní učení. Obsahuje rovněž klasické algoritmy, jako např. gradientní metody (GM). Jelikož praktické aplikace obsahují řadu úkolů, které nelze splnit jednou metodou, může být účinnou kombinace různých algoritmů.

Modelování vlastností materiálů

Dosud bylo uspokojivě vyřešeno a implementováno do profesionálních programů modelování magnetické hystereze ve statických úlohách pomocí různých variant Preisachova modelu. Nevyřešeno je modelování dynamického modelu hysterezní smyčky a výpočet ztrát v magnetických materiálech. Rovněž při řešení úloh nelineární optiky je třeba s vývojem nových materiálů vyvinout odpovídající materiálové charakteristiky. Vznikají materiálové modely nových materiálů, jako např. kompozitních struktur v elektrickém poli, modely zachycující anizotropii v laminovaných magnetických strukturách aj. Nové podněty vycházejí z oblasti magnetického záznamu informace, která představuje samostatnou oblast aplikovaného elektromagnetismu spojenou s novými technologiemi.

Sdružené úlohy

Kombinované sdružené úlohy lze rozdělit do dvou skupin:

První skupinu představují úlohy propojení elektrických obvodů a elektromagnetického pole. V současné době jsou úspěšně modelovány např. různé propojení řídicích obvodů pohonů motoru, statické konvertory aj. Řada publikací popisuje propojení obvodových programovacích systémů, jako je např. P-SPICE se systémy využívajícími MKP. Stejným směrem směřuje vývoj prostředí MATLAB.

Do druhé skupiny patří sdružené úlohy, založené na propojení teplotního, elektromagnetického a mechanického modelu. Ty jsou běžně k dispozici např. v prostředí systému ANSYS. Pracnost výpočtu závisí na vzájemném poměru časových konstant jednotlivých procesů. Často jsou řešeny např. úlohy indukčního ohřevu s následujícím mechanickým zpracováním obrobku. Řada publikací se zabývá studiem vibrací a zdroji hluku v elektromagnetických zařízeních.

Numerické postupy

Do této skupiny patří obecné problémy numerických metod, jako např. práce s daty, vývoj nových metod automatické generace optimálních sítí, nebo nových typů prvků pro jednotlivé metody. Patří sem i vyhodnocení lokální chyby a na jejím základě modifikace a adaptivní generace sítí, numerické řešení nových typů rovnic, jejich vzájemné propojení a nové způsoby diskretizace. Dále sem patří i vývoj nových, stabilnějších a rychlejších typů řešičů soustav rovnic a výpočet vlastních čísel matic. V řadě úloh, založených na MKP, není dosud uspokojivě vyřešen problém otevřených oblastí. Rovněž se vyvíjejí nové metody zavedení hystereze do dynamických procesů.

Elektromagnetická zařízení, aplikace

Výše uvedené metody našly celou řadu praktických aplikací. Optimalizují se návrhy elektrických strojů z hlediska velkého množství návrhových parametrů (zmenšení váhy, rozměrů, zvětšení výkonu, snížení ztrát, modelování supravodivých motorů a generátorů), a to samostatně nebo ve spojení s řídicími obvody. Sestavují se stále přesnější náhradní schémata elektrických strojů. Elektrické stroje a přístroje se stále častěji navrhují jako sdružené problémy.

Novou oblastí je problematika stínění polí a jejich vliv na živé organizmy a okolní prostředí, a to ve spojení s elektromagnetickou kompatibilitou. Ve spojitosti s živými organizmy se rozvíjejí inverzní úlohy např. rezistivní tomografie nebo náhrada EKG a EEG měřením magnetického pole srdečních a mozkových proudů. Rozvíjejí se metody elektromagnetické defektoskopie materiálu s novými typy snímačů.

V oblasti vysokofrekvenční techniky existuje řada zajímavých aplikací od optimalizovaného návrhu antén přes populární modelování vlivu mobilních telefonů na životní prostředí až po počítačově optimalizovaný návrh letadel se „stealth technology“. Návrh propojení sběrnic vysokorychlostních pamětí v počítačích se neobejde bez počítačového modelu, neboť elektromagnetické procesy při kmitočtech nad 1 GHz již nelze modelovat obvodovými modely. Modelování nelineárních optických zařízení slouží již praktickým aplikacím.

Začínají se numericky modelovat problémy tvorby koróny, výbojů a nízkoteplotního plazmatu spolu s rozvojem fyzikálního poznání těchto procesů. Modeluje se rovněž pole v polovodičových zařízeních.

Nové výsledky se rychle zavádějí do profesionálních programových systémů.

Úloha návrhářů a programátorů

Moderní návrhář musí být schopen řešit nelineární 3D časově proměnné pole, avšak potřebuje rovněž optimalizační software k urychlení, zvládnutí a řízení návrhového procesu. Pro podniky nabývá zásadní důležitost investice do programového vybavení, který umožní vzájemné propojení mezi nástroji různých disciplín, tedy např. výměnu dat mezi programy CAD a mezi programy pro analýzu různých typů úloh včetně elektromagnetických, potřebnými pro kompletní návrh. Přestože se toto spojení podařilo v řadě případů realizovat, ukazuje se, že je nedostatek zručných návrhářů, kteří jsou schopni upravit a sladit celý systém.

Moderní výzkumný pracovník má zcela jiný úkol a jeho prvořadým úkolem je tvořivost, která by případně vedla k novým myšlenkám a nápadům, využitelných systémovými

programátory. Nové programy pak mohou být využity návrháři zařízení a pozvednou tak úroveň návrhu. Je třeba vždy mít na paměti, že modelování elektromagnetických polí je část širšího oboru počítačového modelování. Má některé svoje zvláštnosti, neboť na rozdíl od mechaniky elektrické parametry volného prostředí, jako permeabilita nebo permitivita, jsou nenulové v neomezeném prostoru, což je třeba respektovat. Další rozdíly se týkají např. geometrické složitosti komponent, jako jsou cívky vinutí, nebo ohromný dynamický rozsah charakteristických rozměrů, se kterými se pracuje v elektromagnetických zařízeních. To jsou celkem evidentní faktory, mající praktické důsledky, avšak více zřetelné jsou pravděpodobně rozdíly ve fundamentálních formulacích, potřebných pro analýzu pole. Ty jsou z teoretického hlediska zvláštností elektromagnetického modelování.

Další rozvoj oboru

Návrh virtuální laboratoře, uvedený v odstavci o zobecněném návrhu zařízení, vyžaduje vývoj bloků, z nichž některé již existují a realizace jiných je otázkou několika příštích let. Shrňme si na závěr některé oblasti, které představují výzvu pro nejbližší budoucnost.

1. Vytvoření univerzálního programovacího prostředí pro snadnou tvorbu geometrického modelu, které je určeno ke spojení velmi složitých objektů. Toto je oblast, která odděluje modelování elektromagnetických polí od ostatních disciplín při modelování kontinua.
2. Automatické a adaptivní generátory sítí. Ty existují pro 2D pole, avšak pro 3D pole vytvářejí dosud sítě v omezeném množství případů.
3. Vývoj nových metod pro numerické řešení příslušných rovnic pole. Současné metody jsou příliš pomalé na to, aby byly schopny řešit třídy úloh, požadované výzkumem a průmyslem, zvláště pak v souvislosti s optimalizací. Ústředním problémem zde může být nalezení účinnějších metod na algebraické úrovni. Zvláštní pozornost je třeba věnovat velikosti úlohy a její eventuální nesouměřitelnosti. Je otázkou, jak účinné jsou formální metody (MKP, MKD, MKV, FDTD aj.) při řešení složitých úloh s diferenciální nebo integrální formulací. Je možné, že metody založené na analogii s obvody (reluktanční obvody) mohou nabídnout výkonnější alternativu. Je otázkou, jestli jsme dosáhli meze v účinnosti algoritmů a další zlepšení přinese jen zdokonalení architektury počítačů.
4. Řešení optimalizačních a inverzních úloh. Důležitým faktorem je zde rychlost výpočtu účelové funkce, která kriticky závisí na použité proceduře. Ukazuje se potřeba vyvinout optimalizační nástroje, určené specificky k optimalizaci elektromagnetických problémů, které by vzaly v úvahu komplexnost modelů ve volném prostoru, existenci řady lokálních minim aj.
5. Reálný návrh vyžaduje modelování kombinovaných úloh - spojení několika disciplín (elektromagnetismus, teplo, pružnost a pevnost, proudění aj.). Důležitým problémem je volba těsného propojení (paralelní, drahé) nebo volně vázané úlohy (sériová a levnější).
6. Vizualizace a postprocessing. Je třeba využít počítačovou grafiku k dokonalému znázornění výsledků. Otázkou je efektivní využití 3D animace.
7. Databázové systémy. Zde je úkolem, jak zahrnout do systému zkušenost návrhářů, údaje o materiálech, a podnikové a osobní zkušenosti do návrhového prostředí.

8. Přivlastnění si nových fyzikálních zákonů k modelování nových zařízení. Příkladem jsou nové technologie, jako např. vysokoteplotní supravodiče, svazky částic a vzájemná interakce plazmatu aj. Elektrotechnika a elektronika přebírá nové výsledky z fyziky a v poslední době i z oblasti chemie.
9. Výuka elektromagnetismu by měla být v souladu s potřebami výzkumníků a návrhářů jedenadvacátého století.
10. Je třeba rozšířit vzájemné porovnání programů stanovením nových vhodných testů a jejich vzájemným porovnáváním autory programů i experimentátorů při příležitosti setkání na akcích jako vpředu zmíněný TEAM Workshop.

Elektrotechnika a elektronika zde čeká na nové výsledky z oblasti fyziky, matematiky a zřejmě i z chemie a též na větší výkonnost výpočetní techniky.

Problematika výuky modelování polí

Dosavadní stav výuky modelování se v ČR liší na jednotlivých fakultách. V základních předmětech, ať to je Elektromagnetismus, nebo Teorie elektromagnetického pole, se seznamují studenti s principy numerických metod. Na naší fakultě se studenti dříve seznamovali po prvé s MKP v předmětu Numerická matematika, který však byl zrušen. V předmětu Elektromagnetismus jsme přednášeli stručný úvod do numerických metod ve skriptech [10]. V laboratorních nebo numerických cvičeních studenti vytvářejí jednoduché modely využitím programu MEP [11] a MMAP [12], ke kterým existují sbírky, obsahující celé řešení vzorových příkladů a vstupní data pro generaci sítí dalších příkladů. Na ústavech teoretické elektrotechniky nebo jim příbuzným při vysokých školách v Ostravě, v Bratislavě a v Praze si vyučující vytvořili vlastní sbírky k těmto programům např. formou skript. V bakalářském studiu se studenti naší fakulty seznámili s MKP pouze informativně, neboť výuka elektromagnetického pole v odpovídajícím předmětu Užítý elektromagnetismus nepoužívala diferenciální tvar rovnic pole.

Výuka ve vyšších ročnících pokračuje na naší fakultě jen na Ústavu radioelektroniky, kde je používáno prostředí programu MATLAB. Doktorandi jsou v tomto oboru školeni kromě těchto dvou ústavů i na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky na Odboru elektrických strojů a přístrojů.

Oproti osmdesátým létům lze pozorovat pokles zájmu studentů o modelování polí. Ten vyplývá z malých možností uplatnění nabytých znalostí v brněnské spádové oblasti. Zatímco před 15 a více lety existovaly zkušené týmy ve výzkumných ústavech jako VÚEP, VÚES, EGU nebo ÚPT AV, zabývající se problematikou výpočtu polí a podporované výrobními podniky, jsou v současnosti tyto skupiny rozpuštěny a výzkum a vývoj ve výrobní sféře byl prakticky zrušen a přesunut do zahraničních výzkumných center nových majitelů. Další příčinu malého zájmu spatřuji na základě zkušenosti z dlouhodobé spolupráce s průmyslem ve velmi nízké teoretické úrovni konstruktérů – pojmy jako intenzita elektrického pole a její přípustné hodnoty nebo vektorový potenciál, potřebné k práci s modely, jsou pro ně neznámé. Při rutinní práci vystačí s existující bází zkušeností.

Nové učební plány zavedly do bakalářského studia na FEKT řadu prakticky zaměřených předmětů na úkor omezení teoretického základu. Z toho důvodu byl zrušen i předmět Elektromagnetismus a výuka základů elektromagnetismu bude probíhat jen zkráceně v kurzu Fyziky. Zůstává otázkou, jestli a jakou formou mají být bakaláři seznámeni s možnostmi a základy modelování polí. Zatím se o této možnosti neuvažuje. Vzhledem k dobré znalosti zákonů pro elektrické obvody by mohla být studentům bakalářského

studia MKP pro 2D statická a stacionární pole interpretována s využitím sítí lineárních trojúhelníků jako (viz [13])

1. síť vodivostí pomocí I. Kirchhoffova zákona pro rovnice typu *div grad*
2. síť reluktancí magnetického obvodu se sestavením rovnic pro vektorový potenciál s aplikací II. Kirchhoffova zákona na smyčky magnetického obvodu pro rovnice typu *rot rot*.

Výuka Elektromagnetismu byla posunuta do magisterského studia kde mezi volitelné předměty teoretické nadstavby byl zařazen předmět Modelování elektromagnetických polí, jehož jsem garantem. Při jeho výuce budou využity zkušenosti z patnáctileté výuky numerických metod na FEI. V současné době dokončujeme pro potřebu budoucí výuky nové verze 7.0 programů MEP a MMAP pro operační systém Windows, které jsou analogií relativně drahého komerčního programu QUICKFIELD. Pro obor Elektroenergetika bude přepsán program založený na metodě simulovaných nábojů, vhodný pro výpočet polí v rozvodnách. Dosavadní zkušenosti s použitím programového systému ANSYS, který je standardem na VUT, ukazují že přes modernizaci jeho elektromagnetického modulu tento stále nevyhovuje potřebám výuky, neboť složitost modelování zejména 3D úloh odrazuje většinu studentů. Jeho vysokofrekvenční část je omezena na jednoduché způsoby buzení pole a jeho studium a použití lze doporučit jen opravdovým zájemcům v rámci odborných předmětů při finálních ústavěch.

Zkušenosti z výuky v doktorandském studiu ukazují, že je třeba individuální přístup ke studentům a volit zaměření k tématu práce. Namísto práce s univerzálními programy je vhodné studenty nechat sestavit jednoduché samostatné programy, které jim přiblíží lépe pochopit řešenou problematiku. Ke studiu je třeba doporučit základní literaturu, několik aktuálních článků k řešené problematice a zadat projekt, ukončený funkčním programem.

Příspěvek autora k rozvoji oboru

Výpočtem elektromagnetických polí se zabývám od r. 1968. Do r. 1976 jsem se zabýval ve spojení s řešenými výzkumnými úkoly z oblasti elektromagnetické defektoskopie modelováním polí indukčních snímačů. Některé výsledky jsem publikoval v kandidátské a v habilitační práci. V r. 1973 byl na pracovišti k dispozici první importovaný program pro výpočtu 2D nelineárních polí. Podílel jsem se s výzkumnou skupinou katedry na výpočtu NMR magnetů pro ÚPT ČSAV.

Od r. 1980 se věnuji vývoji vlastních programů se zaměřením na výpočet různých typů polí. První program pro výpočet statických polí byl vyvinut ve spolupráci s prof. Zlámalem a za podpory VÚEP Brno. Program využíval aproximaci Hermitovými polynomy, neměl však vlastní generátor sítě a bylo ho třeba provozovat na výkonném počítači mimo VUT.

V průběhu zahraničního pobytu na MTC v Bagdádě v letech 1981 – 1984 jsem pracoval ve skupině, zabývající se vývojem programu, využívajícího 2D MKP a určeného k modelování laminárního proudění. S malými obměnami jsem program přizpůsobil pro výpočet elektrostatických polí. Po návratu z Iráku jsem založil SVK a se skupinou až 10 studentů jsme odzkoušeli programy založené na MKP, MHP, SCM i CSM. Ve spolupráci s VÚEP jsme dále vyvíjeli nový program, využívající 2D MKP k výpočtu elektrostatických polí. Program byl vybaven generátorem trojúhelníkové sítě a postprocesorem, zobrazujícím veličiny pole. Jednotlivé verze programu byly postupně instalovány ve VÚEP Brno. K výpočtu byl používán počítač ADT na VUT a SM ve VÚEP. Omezujícími faktory byla paměť počítače 128 kB a alfanumerický displej.

V r. 1987 byl úspěšně ukončen vývoj programu BEM pro výpočet 3D polí, využívající metodu povrchových nábojů. Byl to pravděpodobně první program v tehdejší ČSSR, počítající třírozměrná elektrická pole. Byly s ním vypočteny různé úlohy pro VÚEP, zachované v diplomových projektech v r. 1987 a 1989. V rámci vývoje tohoto programu jsem navrhl, otestoval a implementoval spojení oblastí 2D a 3D polí ([14]), nový typ toroidálního elementu a odstranění singularit při řešení integrální rovnice ([15]).

Kvalitativní zlom při vývoji nových programů a metod nastal zakoupením prvních počítačů PC na katedru v r. 1988. Urychlilo se ladění programů a k dispozici bylo grafické zobrazení výsledků. Počet řešených rovnic v operační paměti pod operačním systémem DOS stoupl na 300 pro hustou soustavu pro 3D MHP a na 2500 pro řídké soustavy 2D MKP.

Od r. 1991 jsem vedl vývoj programového systému MEP, určeného původně k modelování elektrických polí na základě 2D MKP a rozšířeného postupně v dalších verzích na pole kvazistatická v ustáleném harmonickém stavu a při přechodném režimu (rázové vlny vysokého napětí). Program v současné verzi 7.0 pro Windows nemá praktické omezení počtu rovnic a obsahuje několik originálních prvků, které nebyly nebo dosud nejsou běžně dostupné v profesionálních programech. Program má od r. 1992 upřesněný výpočet toků elektrodami a tím i přesnější výpočet kapacity, dále zpřesnění výpočtu intenzity na elektrodě a umožňuje zavést toky (proudy) elektrodami. Tyto výsledky jsem publikoval převážně na domácích konferencích (viz [16] až [20]); první mezinárodní publikací o těchto metodách, založených na záměně plošných integrálů pro výpočet toků jsem dodatečně našel o 5 let později v [21], a to bez praktické implementace. Porovnání s programy ANSYS a OPERA z té doby ukázaly, že chyba výpočtu příslušných veličin pomocí MEP je o řád nižší.

Volně sdruženými úlohami, při kterých se uplatňuje vliv 3D pole ustálených proudů, 3D magnetické pole a pole proudící kapaliny, popsané Stokesovými rovnicemi, jsem se zabýval při vytvoření přesného modelu indukčního průtokoměru (např. [22]). Výzkum v současné době pokračuje pro případ kdy je průtokoměr s přídatnými elektrodami umístěn v blízkosti ohybu potrubí.

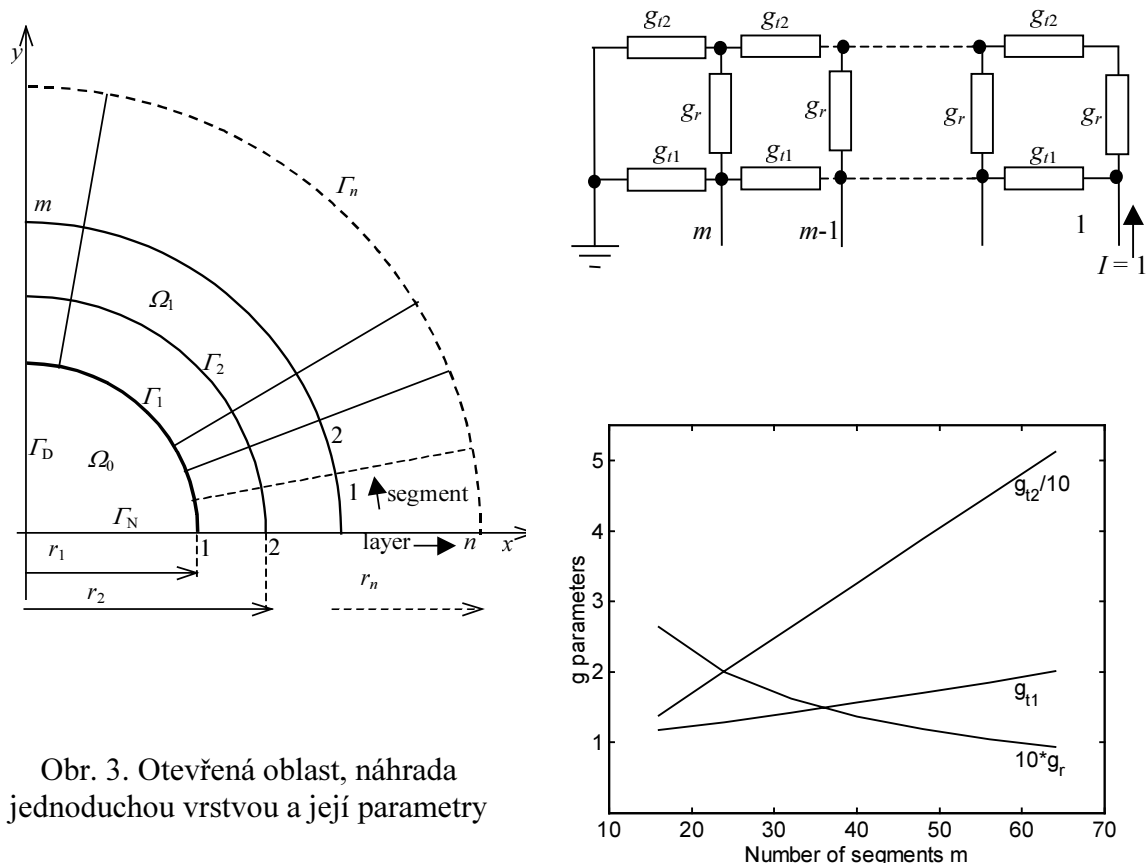
Kvazistatické pole se mi ve spolupráci s doktorandem Ing. Bachorcem podařilo implementovat do prostředí programu ANSYS. I když diskretizovaná forma rovnic má tvar totožný s rovnicemi pro teplotní nebo dynamický model, nepodařilo se nám vložit potřebné okrajové a počáteční podmínky. Definovali jsme proto dva nové typy USER elementů, se kterými jsme dosáhli dobré výsledky – např. [23].

Inspirován prof. Schitzerem z Institutu teoretické fyziky TU Graz jsem vypracoval teorii numerického výpočtu proudů komory s rezistivními stěnami (Resistive plate chamber – RPC) k indikaci polohy vysokoenergetických částic. Teorie je v [24] a výsledky 3D programu s názvem RPC jsou v [25].

V oblasti vysokých kmitočtů jsem vedl diplomovou práci Ing. Smičky (1991), který použil Momentovou metodu k výpočtu vyzářovacích charakteristik antén. O rok později jsem vedl diplomanta Ing. Bachorce, který vypracoval práci „Analýza pole v optickém vlnovodu“ s využitím MKP a v současné době předkládá doktorand Ing. El Ghannam práci, zabývající se šířením signálu v nelineárním optickém prostředí s využitím FDTD.

Pro modelování otevřené oblasti statických polí [26] jsem navrhl tzv. Multipole Matched Layer (MML), která má blízko k metodě, nazývané ballooning, avšak nevyžaduje nastavení nulového potenciálu v nekonečnu. Transformací husté MML matice v jednoduchou, dvojitou nebo trojitou vrstvu umělých elementů použitím optimalizace lze neomezenou oblast rovinné úlohy s hranicí kruhového tvaru (typickou pro elektromotory)

nahradiť otvorenou hranici tromi číslami, ktoré predstavujú jednoduchou umelou vrstvu, pripojenou k hranici (perfect matched layer – PML). Príspevek bol prijatý so zájmom na konferencii COMPUMAG 2001 a bol vyhodnotený medzi tridsaťimi najlepšimi z 650 príspevků. Rozšírená verzia bola prijatá k publikácii v březnovém čísle IEEE Transaction on Magnetics 2002. Na obr. 3 vľavo je model otvorené oblasti (100 vrstev), vpravo nahore náhradní jednoduchá vrstva a dole její parametry v závislosti na počtu uzlů m na hranici.



Obr. 3. Otvorená oblasť, náhrada jednoduchou vrstvou a její parametry

Závěr

Není pochyby o tom, že oblasť počítačového modelování elektromagnetických zařízení jakožto část obecnějšího oboru počítačové simulace se bude dále rozvíjet a v budoucnosti sehraje ve spojení s optimalizačními metodami dominantní úlohu. Vývoj zřejmě bude postupovat dílčími kroky, avšak směrem, který je dnes těžké odhadnout. Lze konstatovat, že nastává doba, kdy práce posledních třiceti let v této oblasti přispěje k rozvoji techniky výsledky stejné zásadní důležitosti, jako kdysi přinesly parní stroje průmyslové revoluci. K tomu však, podle mého názoru, bude muset být učiněn zásadní pokrok v rychlosti zavádění nových metod do praxe, neboť řada objevů a nových technologií stále vzniká na základě experimentu.

Literatura

- [1] IEEE Transactions on Magnetics, r. 1991 – 2001
- [2] Sadiku M. N. O.: Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press, 2001
- [3] Chari M., Salon S.: Numerical Methods in Electromagnetism. Academic Press, 2000
- [4] Reece A. B. J., Preston T.: FEM in Electrical Power Engineering. Oxford Press, 2000
- [5] Bossavit A.: Computational Electromagnetism. Academic Press, 1998
- [6] Silvester P., Ferrari R.: Finite Elements for Electrical Engineers. Cambridge Univ. Press, 1996
- [7] Xin-Hua Wang: FEM for Optical Waveguides. Gordon and Breach, 1995
- [8] Taflove A.: Computational Electrodynamics. F-D T-D Method. Artech House, 1995
- [9] Igarashi H.: On the Property of the Curl – Curl Matrix in Finite Element Analysis With Edge Elements. IEEE Trans. on Magnetics, No. 5, 2001.
- [10] Dědek L., Dědková J.: Elektromagnetismus. Skripta VUTIUUM Brno, 2000.
- [11] Dědek L., Dědková J.: Program MEP v. 5.1 k modelování 2D elektrostatických a proudových polí. VUT Brno, 1995.
- [12] Dědek L., Dědková J.: Program MMAP v. 5.1 k modelování 2D magnetických a kvazistacionárních harmonických polí. VUT Brno, 1995.
- [13] Dědek L.: Veřejná přednáška v rámci profesorského řízení na FEI VUT Brno, 2001.
- [14] Dědek, L.: Some alterations of integral equations for the surface charge method. Journal of electrical engineering, Vol. 44, No. 7, 1993, pp. 193-196
- [15] Dědek L., Dědková J.: Some improvements of numerical techniques for the surface charge method, Int. Journal of Appl. Magnetics and Mechanics. Vol. 6 , No. 2, 1995, pp. 89-101.
- [16] Dědek, L.: Modelování elektrod se zadanými toky v MKP. Sborník konference "Moderní metody teoretické elektrotechniky", Plzeň, 1993, str. 162-165.
- [17] Dědek, L.: Zpřesněný výpočet toku hranic s Dirichletovou podmínkou metodou konečných prvků. Sborník 7. mezinárodní vědecké konference, sekce Teoretické elektrotechniky. TU FEI Košice, 1994, str. 149-152.
- [18] Dědek, L.: Implementace elektrod s plovoucím potenciálem do metody konečných prvků. Sborník 7. mezinárodní vědecké konference, sekce vysokého napětí. TU FEI Košice, 1994, str. 217-221.
- [19] Dědek, L.: Zpřesněný výpočet vzájemných kapacit v soustavě elektrod metodou konečných prvků. Sborník konference "Radioelektronika 94", Brno, 1994, str. 371-374.
- [20] Dědek, L.: Implementation of total prescribed electrode fluxes into a FEM potential program. 18th SPETO, Gliwice, Polsko, 1995, Vol. 1, pp. 111-116.
- [21] Dular P., Legros W.: Coupling of Local and Global Quantities in Various Finite Element Formulations and its Application to Electrostatics, Magnetostatics and Magnetodynamics. IEEE Transactions on Magnetics, No. 5, 1998, str. 3078 - 3081.
- [22] Burian, I., Dědek, L., Dědková, J.: Analysis and optimization of an inductive flowmeter, 8th ISTET, Thessaloniki, Řecko, 1995, pp. 506-509
- [23] Bachorec, T., Dědek, L.: Evaluation of 3D Transient Electric Field in ANSYS Environment. Proc. 16th CAD-FEM users' meeting, Bad Neuennahr-Ahrweiler, SRN, 1998, pp. 2.15.1-2.15.6
- [24] Dědek, L.: A Numerical Quasi-Static Method to Compute Signals in High-Resistive Plate Chambers. Sborník Mezinárodní konference AMTEE'99, ZČU Plzeň, 1999, str. A9-A12. ISBN 80-7082-541-3
- [25] Dědek L., Dědková J.: „Numerical Evaluation of a Signal in Resistive Plate Chamber.“ Measurement 2001, 3rd Int. Conference, Smolenice, 2001
- [26] Dědek L., Dědková J., Valsa J.: Optimization of Perfectly Matched Layer for Laplaces Equation. COMPUMAG, Evian, France, 2001, p. II-78 – 79.

Abstract

This lecture presents a survey of the up-to-date state of the art and future perspectives of the region known as the Computational Electromagnetism (CEM). The use of computer modelling has increased enormously over the past decade, and it is rapidly becoming one of the more important tool at the designers' disposal. It is important then to maintain a clear impression of the techniques that are presently available, and the applications that can now be solved using electromagnetic field computation.

A short introductory part presents a survey of Maxwell's equations and their simplifications, describing static, quasi-static, stationary and quasi-stationary fields. This part is followed by a short historical survey of the area of computational electromagnetism.

The more recent advances in computer modelling are discussed in detail. The list of modern numerical methods is followed by the latest classification of the CEM area. This classification includes the following areas: Modelling of fields (from static fields to electromagnetic waves), application to the area of electromagnetic compatibility, generalized problem of optimisation, material modelling, coupled problems, numerical techniques, and electromagnetic devices and their application. The role of designers and programmers is evaluated.

A short passage of the lecture is devoted to the problem of EMC education with special regard to the changes in the Faculty curricula.

At the conclusion of the lecture the author's contribution to the EMC area is summarized.