

Počítačová simulace, vizualizace a analýza fyzikálních polí v praxi (1. část)

Ing. Jan Růžička,
konzultant v oblasti projektování

Tímto dílem zahajuje vlastní seriál avizovaný v minulém čísle. Předchozí obecný popis etap řešení bude ilustrován na jednoduchém příkladu z magnetostatiky, ve kterém bude analyzováno pole válcové cívky s jádrem.

Tento příklad a veškeré další příklady seriálu jsou řešeny programem QuickField™-Professional ver. 5.8 (dále jen QF). Jde o program určený zejména k řešení úloh elektromagnetického (EM) pole metodou konečných prvků. Zahrnuje v sobě i možnost řešit teplotní, napěťová a deformační pole těles. Umožňuje řešit i tzv. slabě sdružené úlohy. Jednotlivé moduly programu jsou mezi sebou provázány tak, že výsledky řešení jednoho z polí lze použít jako vstupní veličiny jiného pole. Například lze sledovat, jak EM pole vytváří teplotní a deformační pole v tělese. Bližší informace o programu a jeho použití lze nalézt v [3] a [4].

Příklad č. 1

Zadání

Je dána válcová cívka (solenoid) s feromagnetickým jádrem o průměru 36 mm a délce 200 mm, umístěná ve volném prostoru. Vinutí má 400 těsně navinutých závitů v šířce 190 a výšce 3 mm. Jeho měděným vodičem teče stejnosměrný proud 2 A. Magnetické vlastnosti jádra, které dosud nebylo magnetováno, popisuje tabelovaná magnetizační křivka.

Tab. Magnetizační křivka válcové cívky

B (T)	0,2	0,6	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7
H (A·m ⁻¹)	70	150	300	450	920	3 000	5 000

Poznámka: Zadání je shodné se zadáním příkladu č. 1 autorova článku [2].

Úloha

- zobrazit průběh magnetické indukce v cívce a jejím okolí barevnou mapou,
- určit průběh magnetické indukce v rotační ose cívky.

Řešení

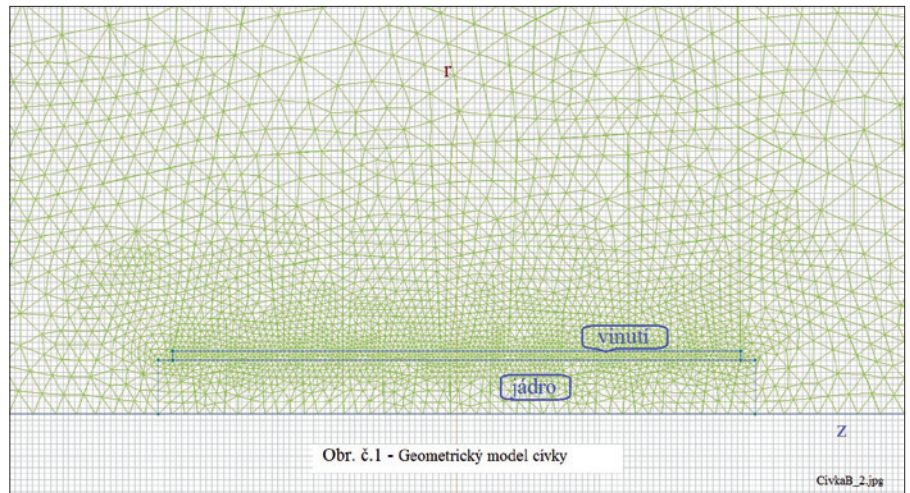
1. Příprava úlohy (preprocessing)

Po zadání jména úlohy *CivkaB* se z nabídky standardních oblastí vybere magnetostatika. V dalším kroku se jako souřadný systém zvolí osová symetrie a jako délková jednotka mm.

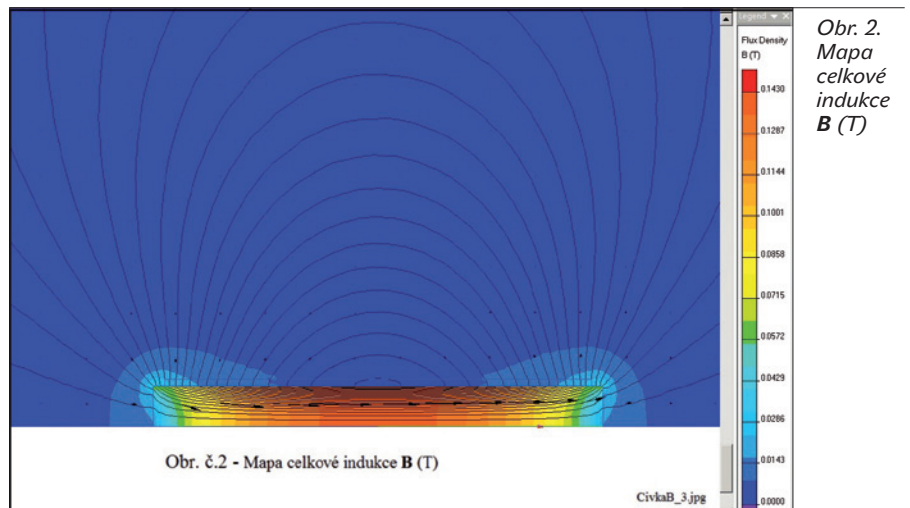
1.1 Tvorba geometrického modelu

Následně se na monitoru zobrazí souřadnicový osový kříž na čtverečkovém pozadí. Vodorovná osa je rotační osa z a svislá pro radiální souřadnice r . Čtverečková mříž usnadňuje pravoúhlé kresby. Před zahájením vlastní

čtový čas. Výsledkem musí být vždy určitý kompromis mezi těmito protichůdnými požadavky. Co se týče tvaru hranice oblasti, lze doporučit zvolit ji tak, aby vzdálenosti k obrysu zdroje od ní v různých směrech se příliš nelišily. V uváděném případě bude zvolena sférická oblast s poloměrem $r = 2\,000$ mm.



Obr. 1. Geometrický model cívky



Obr. 2. Mapa celkové indukce B (T)

kresby je třeba se rozhodnout, jaký tvar a velikost řešené oblasti budou zvoleny. Obecný univerzální návod neexistuje. V silnoproudé elektrotechnice je obvykle zjišťováno blízké okolí zdrojových těles (zařízení). Je třeba si uvědomit, že čím větší oblast bude zvolena, tím přesnější obraz pole v zařízení a jeho blízkém okolí se získá. Proti tomu však působí skutečnost, že velká oblast znamená mnoho uzlových bodů pro výpočet a delší výpo-

Na monitoru tak bude vlastně vytvářen osový řez zadání. Vzhledem k osové symetrii se kreslí pouze horní polovina řezu, tj. vždy $r \geq 0$! Hranici oblasti tak představuje půlkružnice se středem v počátku a její průměr, kterým je úsečka ležící v ose z . Vlastní cívku tvoří dvě podoblasti (bloky): vinutí a jádro, které se zobrazují jako sousedící obdélníky. Další podoblastí je okolí cívky – vzduch. Geometrický náčrt se vytváří v interaktivním gra-

fickém editoru. Oblast a podoblasti tak lze vytvořit buď výběrem z nabídky uzavřených tvarů (obdélník, kružnice, elipsa), nebo řetězením úseček a oblouků. Součástí editoru je tzv. lupa, která umožňuje potřebnou oblast zvětšit a usnadnit kresbu. Aktuální poloha kurzoru se zobrazuje na dolní liště programu. Geometrický model cívky po zasífování je na obr. 1.

1.2 Vlastností bloků

Pojmenovaným blokům a vnější hranici je nutné zadat fyzikální vlastnosti:

- jádro – v zadávacím okně oblasti se zaškrtně volba *nonlinear* a zadají se údaje podle tabulky,
- vinutí – zde se zadá relativní permeabilita $\mu_x = \mu_y = 1$ a celkový proud $I = 800$ A,
- vzduch – zadá se pouze $\mu_x = \mu_y = 1$.

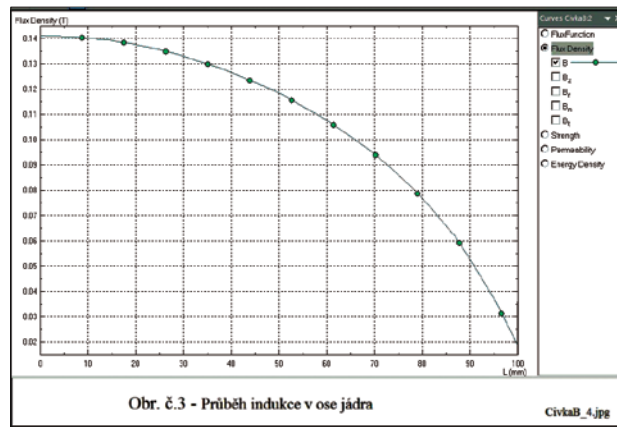
1.3 Vlastnosti hranice

Z nabízených možností se podél celé hranice řešené oblasti zvolí podmínka nulového magnetického toku (tzv. Dirichletova podmínka).

Poznámka: QF umožňuje zadat i průběh magnetického toku (nebo jiné veličiny) podél hranice funkčním vztahem. To značně rozšiřuje aplikační možnosti programu.

1.4 Síť

Příprava úlohy bude ukončena vygenerováním sítě. Z kontextové nabídky lze zvolit automatické vygenerování ve všech blocích,



Obr. 3. Průběh indukce v ose jádra

nebo pouze v některých, kde lze zadat jemnost sítě. Zvolí se: ve všech blocích. Výsledkem je tzv. adaptivní síť, která svoji hustotu přizpůsobuje šířce síťovaného bloku. Všimněme si vysoké hustoty ve vinutí a jeho okolí.

2. Řešení úlohy (processing)

Průběhne zcela automaticky po kliknutí na ikonu.

3. Analýza výsledků (postprocessing)

Po skončení výpočtu program automaticky přejde do poslední fáze, postprocessingu. V řešené oblasti se zobrazí ekvičáry, v tomto

případě křivky konstantního magnetického toku Φ (Wb). Z kontextové nabídky lze zobrazení doplnit barevnou mapou vybrané veličiny (indukce, intenzity, magnetického toku aj.). Pro zobrazení lze zvolit buď celkovou veličinu, nebo pouze vybranou složku. V tomto případě byla zvolena celková indukce B (T). Zvětšený střed oblasti s cívkou je na obr. 2. Program umožňuje zobrazit průběh veličiny podél zvolené úsečky (popř. řetězu úseček) nebo kruhového oblouku. Po zakreslení křivky lze obdržet grafický nebo tabulární výstup. V řešeném případě po zakreslení úsečky od středu, do pravého konce cívky v ose z , je výsledkem graf na obr. 3. Tím je úloha

příkladem splněna.

(pokračování)

Literatura:

- [1] RŮŽIČKA, J.: *Simulace, vizualizace a analýza fyzikálních polí v počítači*. Elektro, 8-9/2011.
- [2] RŮŽIČKA, J.: *Umíme správně spočítat solenoid s jádrem?* Elektro, 5/2006.
- [3] <http://www.quickfield.cz>
- [4] <http://www.quickfield.com>