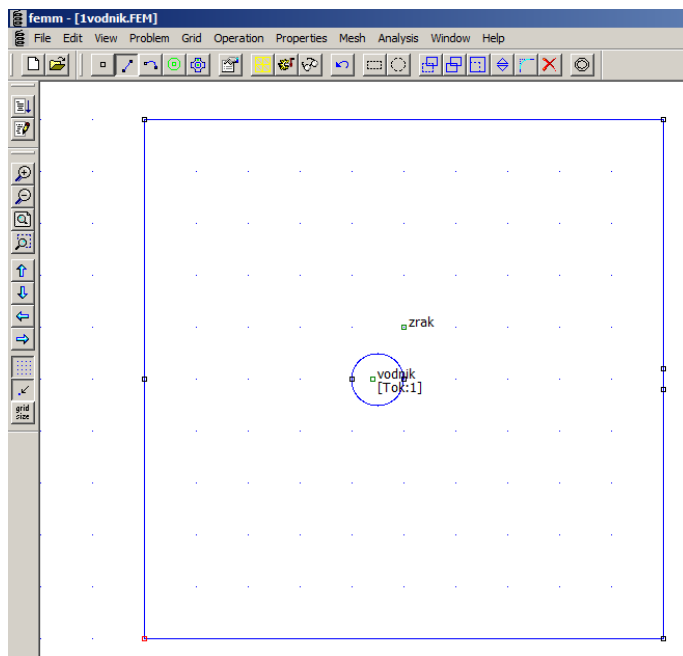


Simulacija magnetnega polja s programom FEMM

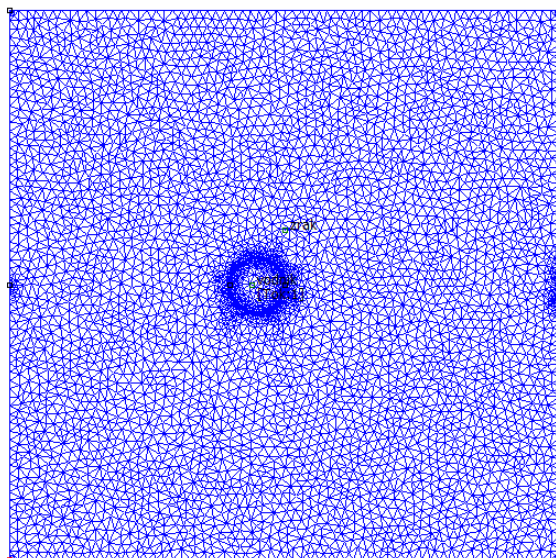
FEMM (Finite Elements Method Magnetics) je programsko orodje (za Linux in Windows operacijska sistema) za numerično simulacijo električnih in magnetnih pojavov. Je popolnoma brezplačen za uporabo in omogoča izračune potenciala in polja preprostejših 2D struktur. Spletna stran je <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. Delo s tem programom bolj podrobno obravnavamo pri predmetu Aplikativna elektromagnetika (izbirni modul v tretjem letniku). Če imate veselje, pa se lahko s programom poigrate tudi sami.



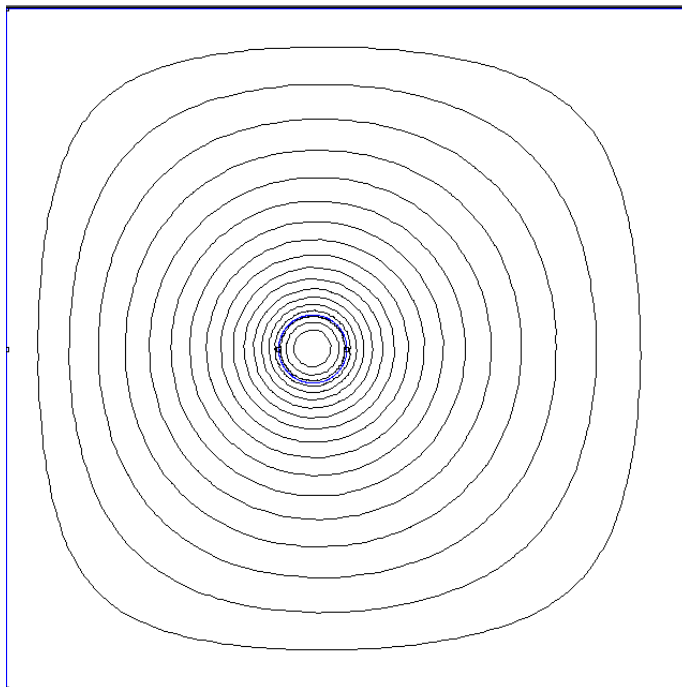
1. Raven poln okrogel vodnik

Slika na desni prikazuje simulacijsko strukturo polnega vodnika realizirano s programom FEMM. Poleg geometrije moramo opisati še električne/magnetne lastnosti materialov (v našem primeru zrak in baker), vzbujanje (tok v vodniku) in robne pogoje (vrednost polja na robu strukture). V konkretnem primeru je izbran tok v vodniku 1A in na robu normalna komponenta polja na robu strukture enaka nič.

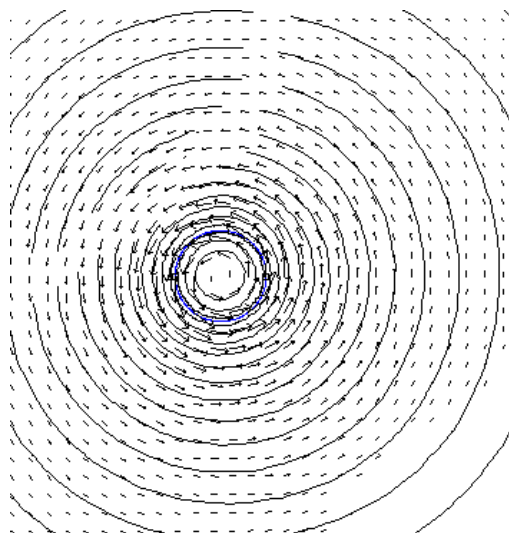
V naslednjem koraku je potrebno strukturo diskretizirati, to pomeni razdeliti strukturo na majhne delčke znotraj katerih (običajno) predpostavimo linearno spreminjanje polja. V konkretnem primeru se za diskretizacijo uporabi trikotniške elemente, numerična metoda pa se imenuje metoda končnih elementov (finite elements). Več kot je uporabljenih elementov, bolj se izračun približa pravilni vrednosti, obenem pa je tudi izračunavanje podaljšano, saj vsak element predstavlja eno enačbo. Slika na desni prikazuje diskretizirano strukturo s 6573 elementi. Pogosto se zamreži strukturo tako, da je okoli neravnih delov število elementov bolj gosto, kar dela tudi program FEMM.



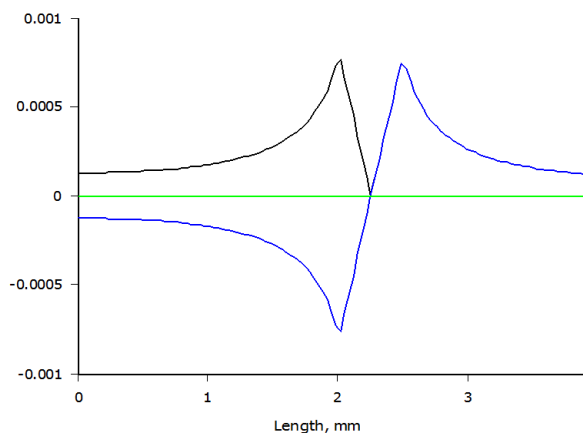
Izračunu sledi izris polja, za kar uporabimo več različnih načinov izrisa. Slika na desni prikazuje gostotne cevke (silnice) v okolici polnega vodnika s tokom 1 A. Ugotovimo, da so gostotne cevke krožnice, ki pa proti meji simulacijske okolice postajajo vedno bolj oglate. To je napaka, ki je posledica robnega pogoja, da je normalna komponenta gostote magnetnega pretoka v okolici enaka nič. Ta pogoj ni popolnoma ustrezen, zato je natančnost izračuna polja ob robu slabša kot v sredini. Za večjo natančnost lahko narišemo strukturo z večjo okolico, to okolico narišemo bolj primerno (v konkretnem primeru v obliki kroga) ali vzamemo bolj primeren robni pogoj (če to program omogoča).



Poleg gostotnic lahko rišemo tudi vektorje gostote magnetnega pretoka, kot kaže slika na desni. Pri tem ugotovimo, da je smer enaka smeri gostotnic, hkrati pa vidimo tudi njihovo velikost.

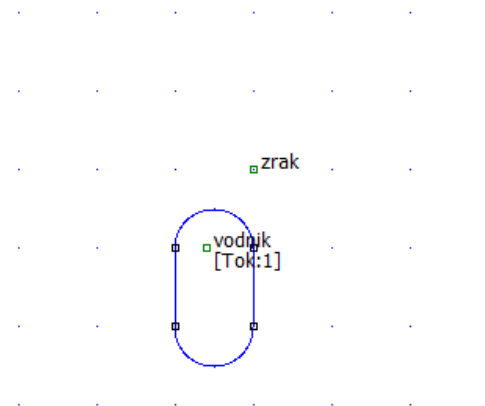


Bolj natančno lahko velikost polja ugotovimo, če izrišemo polje v določenem preseku. Slika na desni prikazuje velikost Y komponente gostote magnetnega pretoka po sredini preseka vodnika (modra) ter absolutno vrednost (črna). Ugotovimo, da znotraj vodnika polje linearno upada v smeri središča, da je največje na površini vodnika ter da v zunanosti vodnika upada kot $1/r$. To vemo tudi že iz analitične rešitve, ki smo jo dobili z uporabo Amperovega zakona.

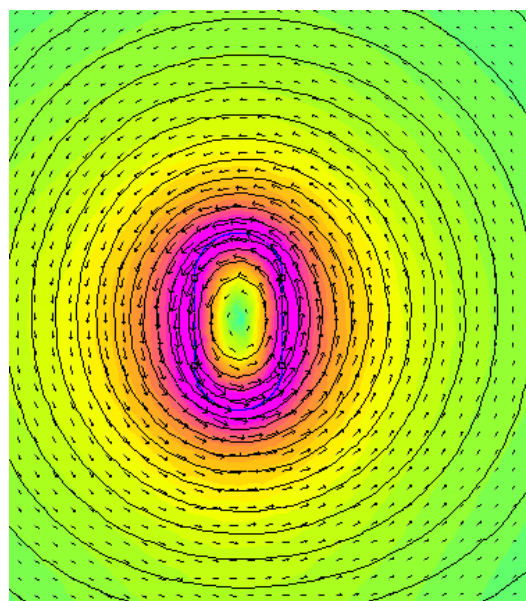


2. Raven vodnik poljubne oblike

Zakaj bi torej uporabili numerično simulacijo? Zato, ker je z njo enako zahtevno izračunati polje tudi za strukture, ki bi jih bilo analitično zelo težko oz. praktično nemogoče izračunati. Preprosto smo spremenili obliko vodnika kot kaže slika na desni in ponovili simulacijo.

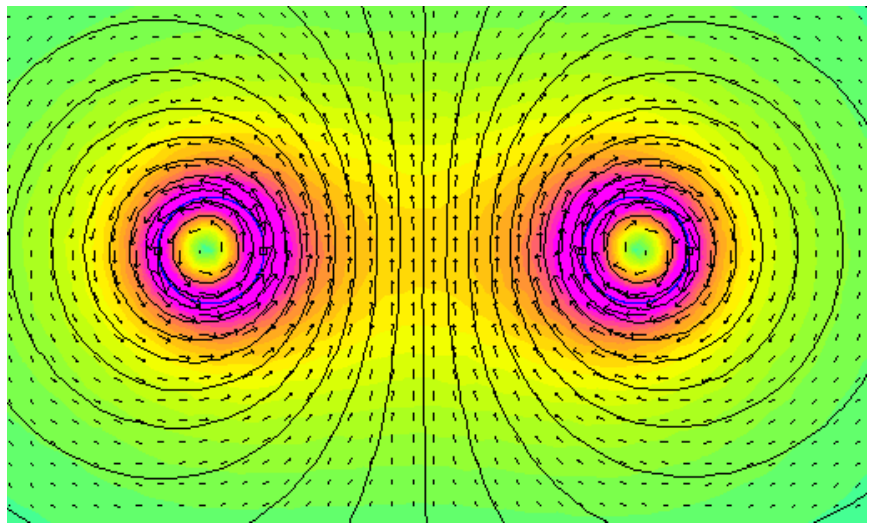


Za lepši prikaz dodamo še barvno sliko. V konkretnem primeru z barvo označimo velikost gostote magnetnega pretoka pri čemer bolj "vroča" barva predstavlja večje polje.



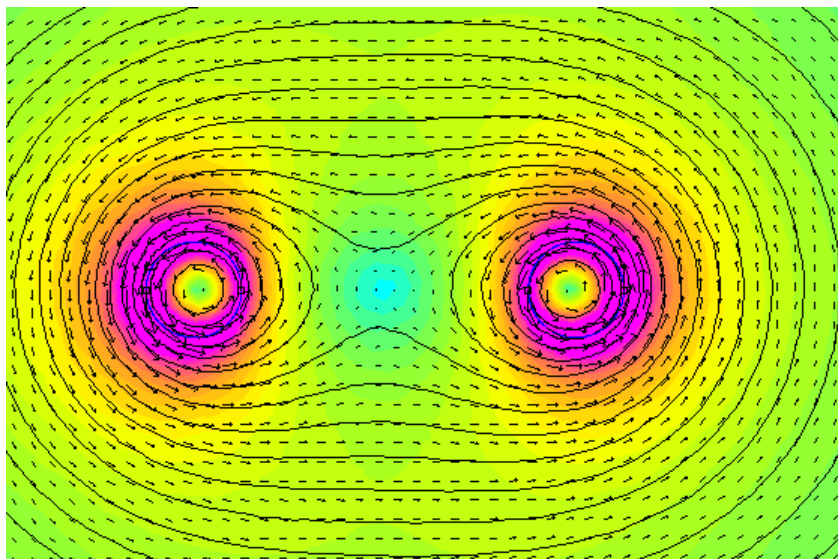
3. Dva ravna okrogla vodnika (tok v nasprotno smer)

Na desni je prikaz izračuna polja v okolici dveh vodnikov, pri čemer je smer v vodnikih obrnjena (dvovod). Ugotovimo, da se polji med vodnikoma "podpirata", torej seštevata, kar pa ne drži stran od vodnikov. Zato vidimo, da pride do podobnega pojava kot pri elektrostatiki, kjer smo imeli pri obravnavi dveh naelektrenih valjev zamaknitev navideznega naboja glede na geometrijsko središče.



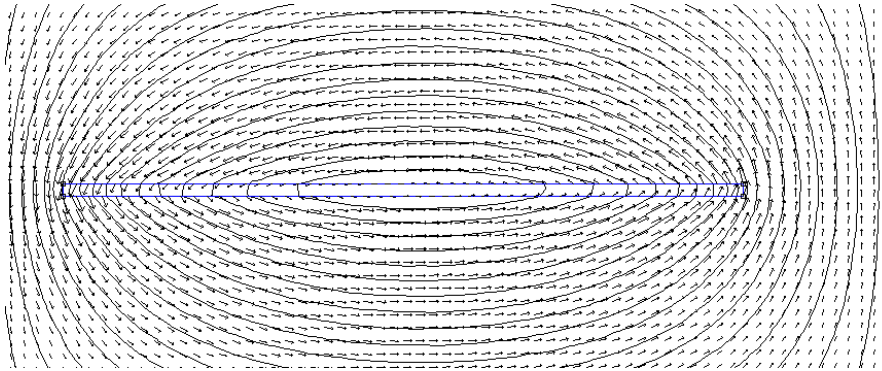
4. Dva ravna okrogla vodnika (tok v isto smer)

Drugače pa je, če je tok v vodnikih v isto smer. Tedaj se polji med vodnikoma izničujeta, stran od vodnikov pa se seštevata.

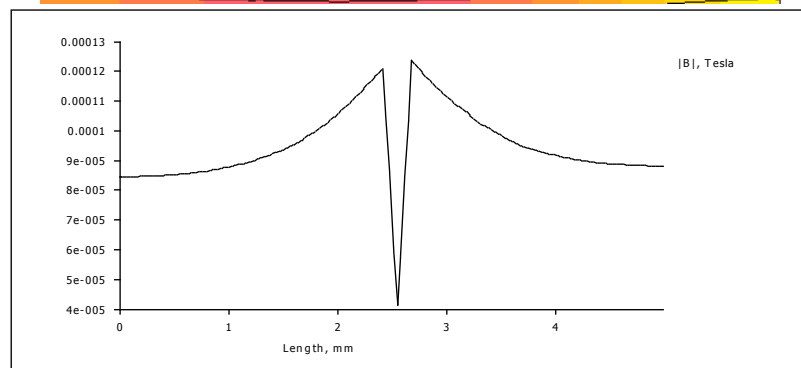
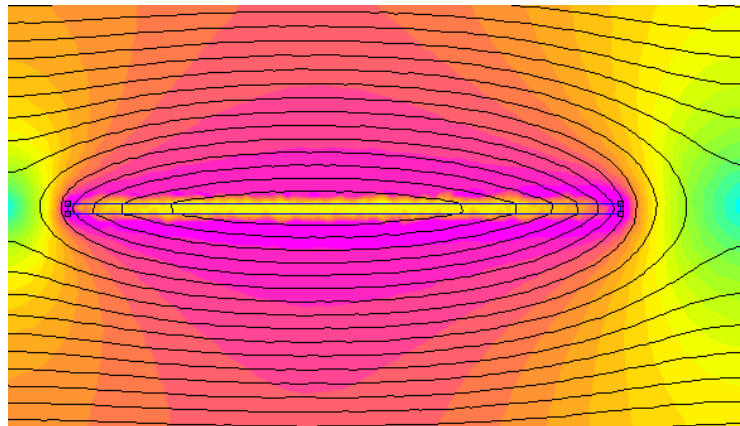


5. Trakasti vodnik (tok iz lista)

Slika prikazuje polje v okolici trakastega vodnika. Vidimo, da je polje krožno, da pa je nad sredino traku precej homogeno. Polje je sicer krožno okoli vodnika vendar na nad sredino vodnika opazimo, da je polje nad vodnikom usmerjeno prečno v levo, pod vodnikom pa v desno. To smer lahko predvidimo tudi s smerjo prstov desne roke, če palec usmerimo v smer toka.



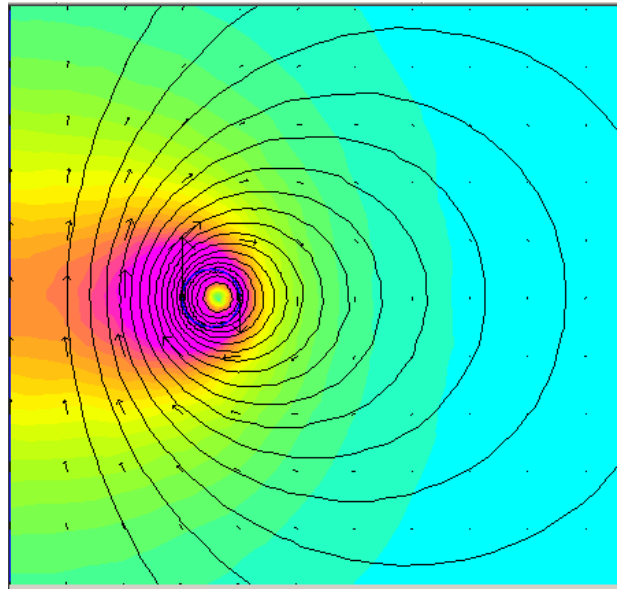
Spodnja slika kaže velikost polja, ki je seveda največje v bližnji okolici vodnika, hkrati pa je precej enake velikosti gledano v prečnem preseku (glej sliko spodaj).



6. Aksialno simetrična simulacija – tokovni obroč

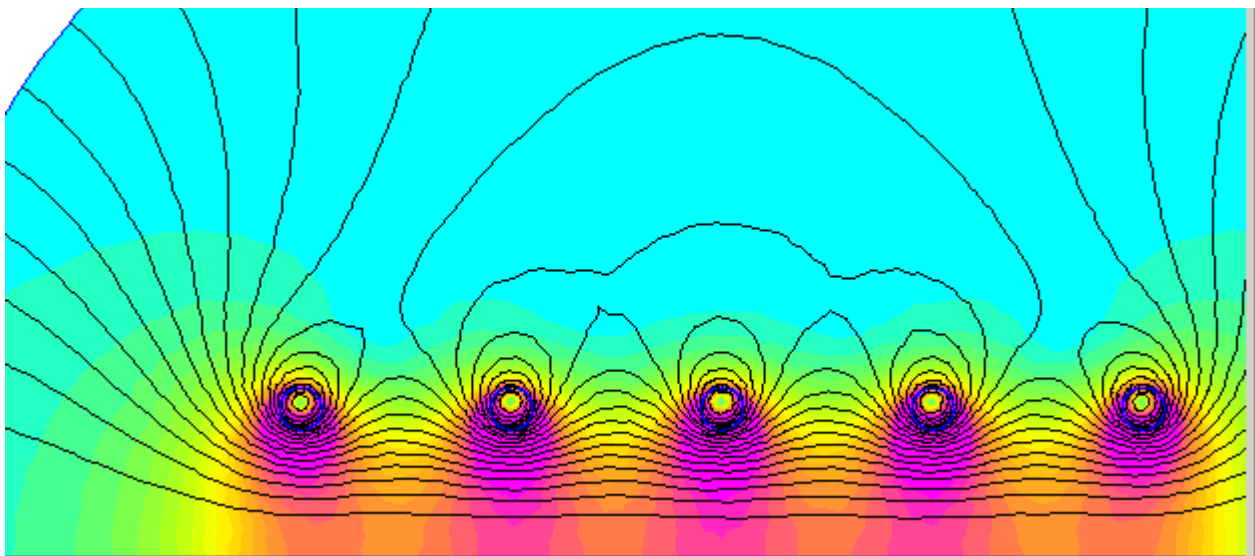
Aksialno simetrična simulacija (rotacija okoli vertikalne osi) je primerna za rotacijsko simetrične strukture. Na primer za toroidno obliko vodnika (obroč), pri čemer se dejanska simulacija opravi le pri enem kotu ($\phi=0$), rezultat pa se smatra pravilen za vse kote in ga lahko zavrtimo okoli Z osi.

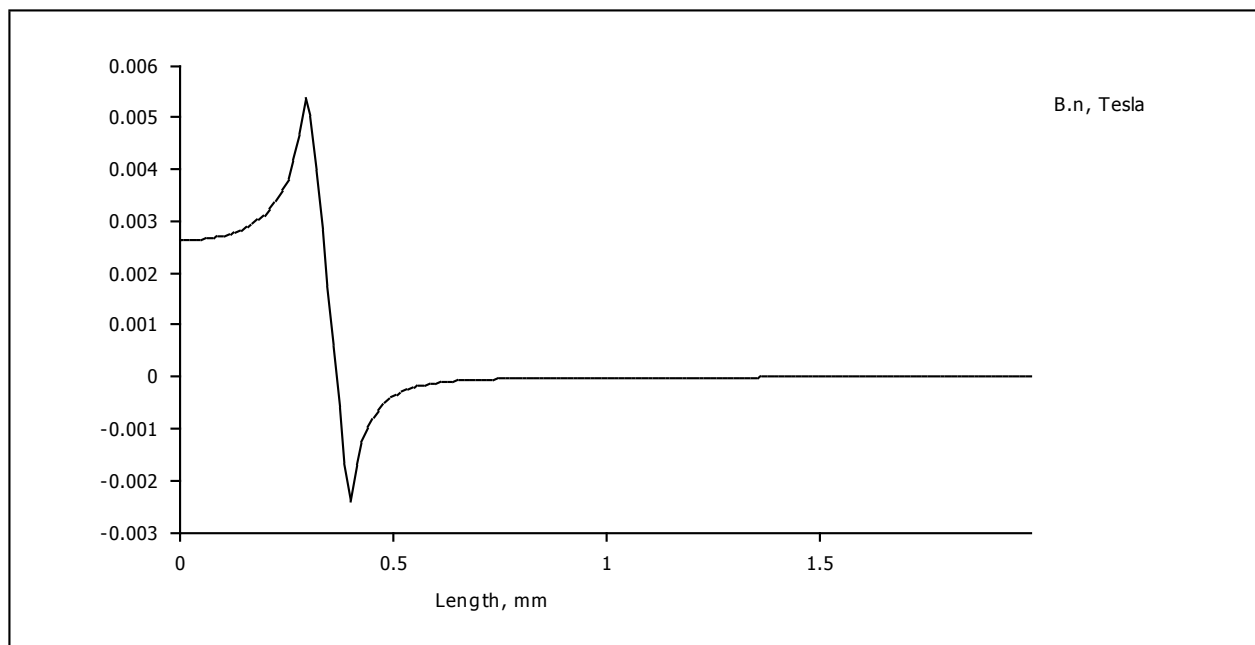
Nas sliki je primer izračuna polja tokovnega obroča v aksialni simetriji. To pomeni, da prikazujemo le izračun v preseku (pri $\phi=0$) od radija nič do ...



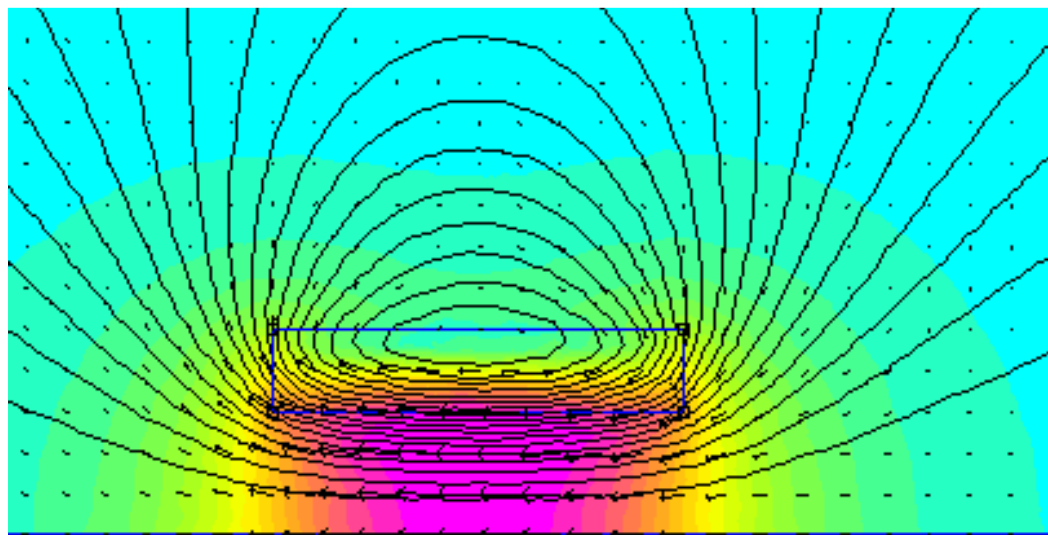
7. Aksialno simetrična simulacija – 5 obročev

Slika spodaj prikazuje polje v okolici 5 obročev (rotacija okoli X osi). Ugotovimo, da so gostotnice zgoščene znotraj obročev, v zunanosti jih je mnogo manj. To tudi pomeni, da bo polje mnogo večje med obroči kot v zunanosti, kjer se prispevki polj izničujejo. To kaže tudi spodnja slika, ki prikazuje velikost polja v vertikalnem preseku, ki gre skozi enega od vodnikov. Vidimo, da se velikost polja znotraj vodnika spreminja linearno, med obroči se zmanjša na neko konstantno vrednost, v zunanosti pa gre dokaj hitro proti nič.

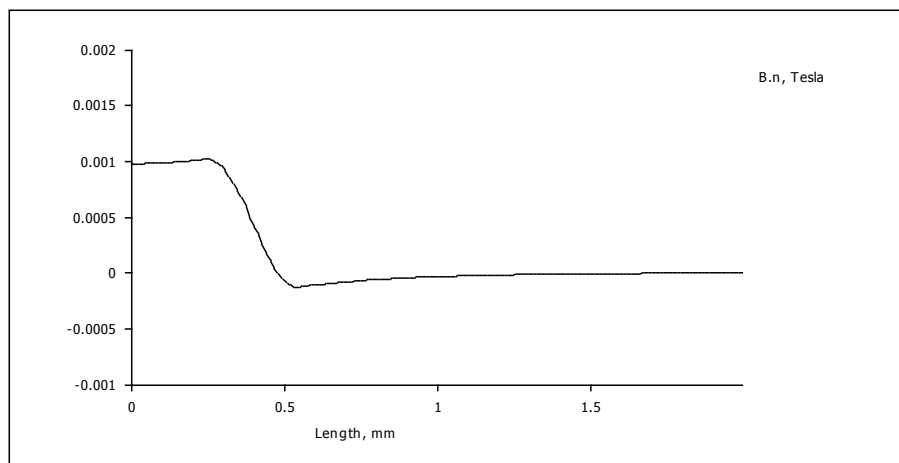




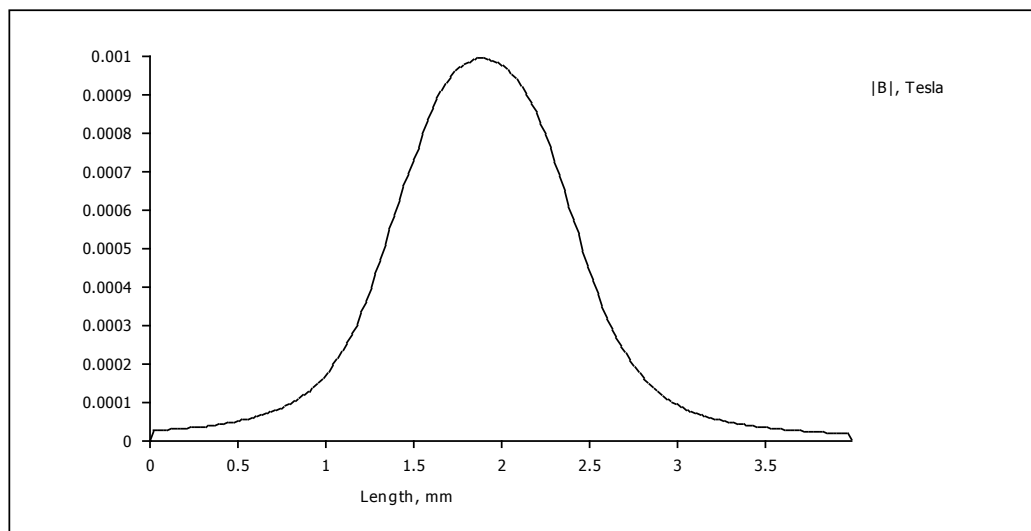
8. Aksialno simetrična simulacija – tuljava



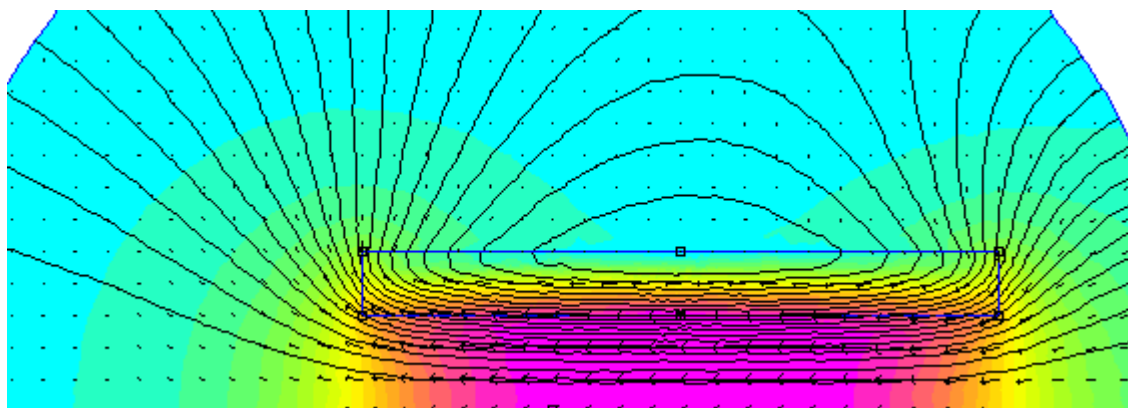
Polje tuljave (os rotacije je X)



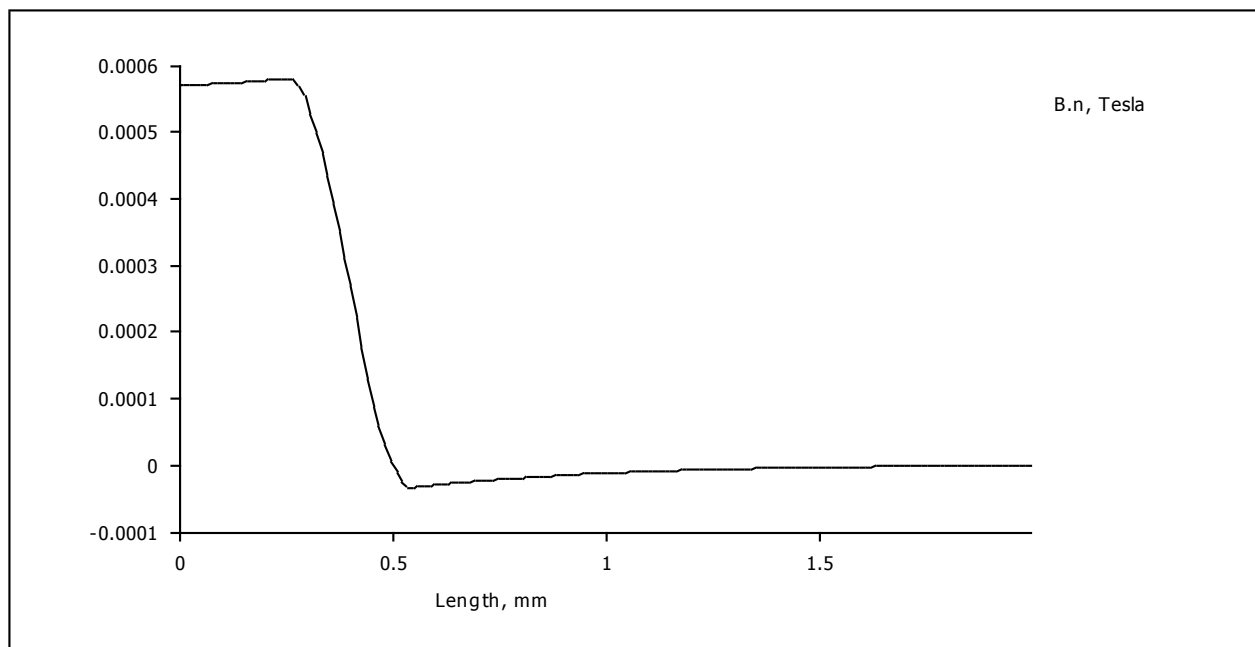
Polje prečno na tuljavo



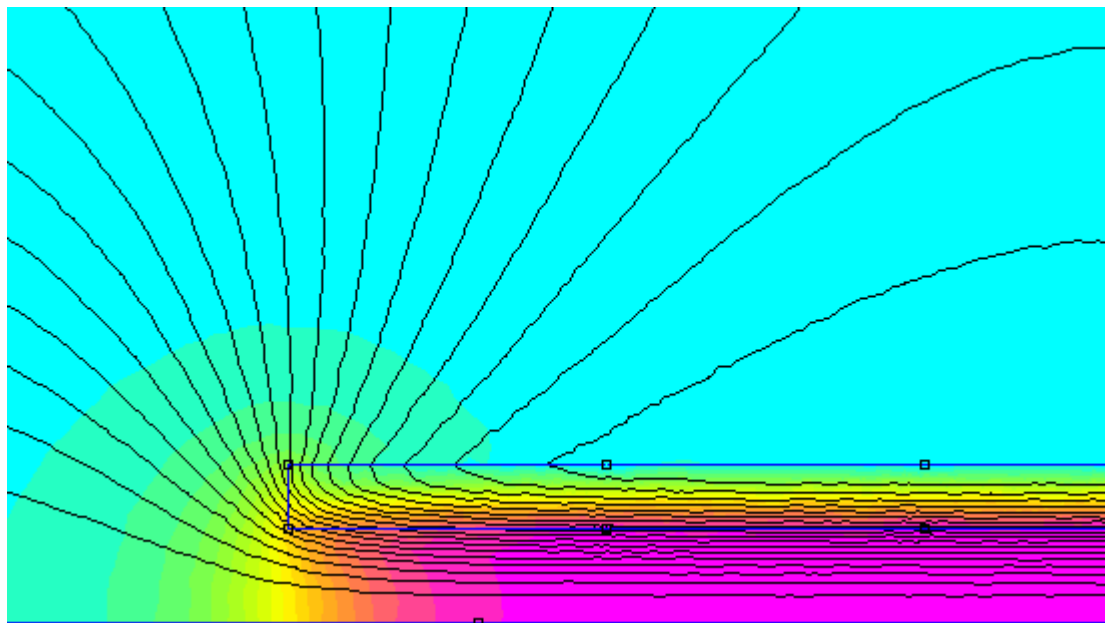
Polje v osi tuljave



Polje daljše tuljave

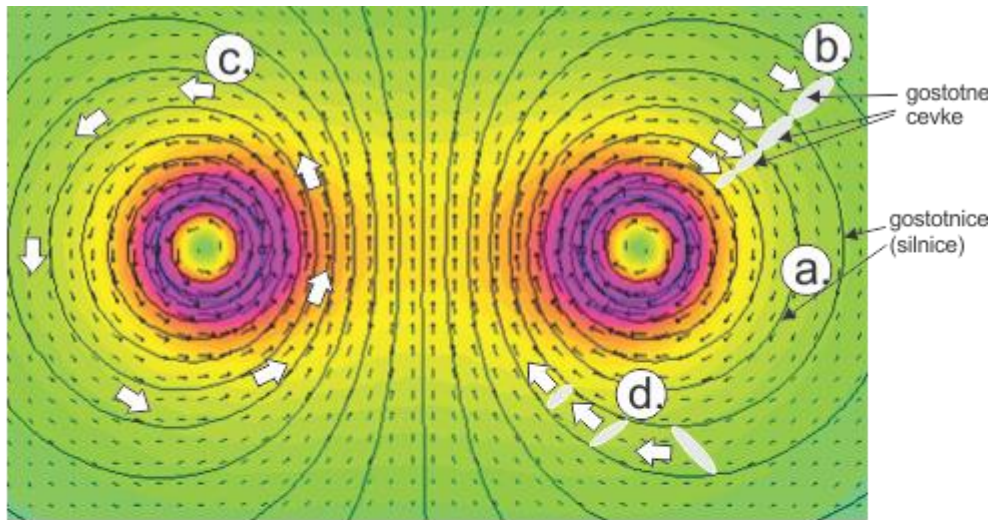


Polje v preseku daljše tuljave



Zgoraj polje na desni strani nezaključene (dolge) tuljave. Polje je praktično le v notranjosti tuljave, v zunanosti se zelo hitro zmanjša, še posebno nad tuljavo,.

Gostotne cevke



- (a.) gostotnice tvorijo povezani vektorji gostote magnetnega pretoka in kažejo usmerjenost polja (ne pa velikosti in smeri)
- (b.) gostotnice tvorijo gostotne cevke znotraj katerih je enak magnetni pretok (fluks). Večja zgoščenost gostotnih cevk pomeni večje polje.
- (c.) magnetno polje je usmerjeno vzdolž gostotnic. Slika prikazuje vrtničnost polja.
- (d.) fluks znotraj gostotne cevke je enak po poljubnem preseku cevke