

Určení horizontální polohy plazmatu a jejího řízení

Jindřich Kocman
Mariánská 10. 1. 2012

Úvod

Proč je nutné určit polohu plazmatu:

- plazma se během výboje vlivem různých sil v tokamaku pohybuje
- stočením plazmatu do torusu vznikají další síly, které roztahují prstenec

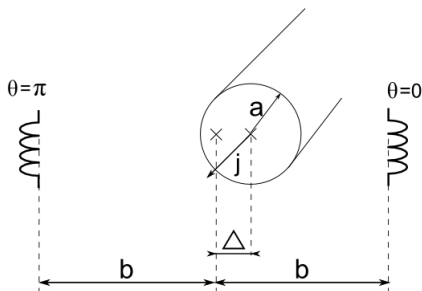
⇒ kontaktem plazmatu se stěnou komory plazma zanikne

Určení polohy

- 1 Teorie
 - Přiblížení rovného vodiče
 - Započtení toroidálních efektů
- 2 Zapojení na tokamaku GOLEM
- 3 Naměřená data

PŘIBLÍŽENÍ ROVNÉHO VODIČE

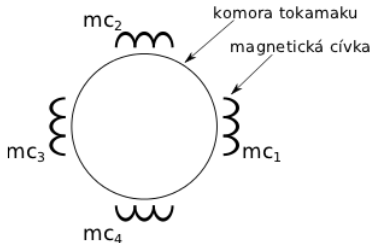
- uvažujeme nekonečný rovný vodič
- Ampérův zákon $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \Rightarrow$ magnetické pole klesá jako $1/r$



$$\Delta = \frac{B_{\theta=0} - B_{\theta=\pi}}{B_{\theta=0} + B_{\theta=\pi}}$$

PRO: rychlost – nutné znát pouze dvě hodnoty
 PROTI: nepřesnost – toroidální efekty nejsou brány v úvahu

ZAHRNUTÍ TOROIDÁLNÍCH EFEKTŮ



$$\Lambda = \left(\frac{B_1}{2} - \bar{B}_z \right) \frac{R_0}{B_0 b} - \ln \frac{b}{a} + 1$$

$$\Delta_R = \frac{B_1}{2B_0} b - \frac{1}{2} \left[\ln \frac{a}{b} - 1 + (\Lambda - 1/2) \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \right] \frac{b^2}{R_0}$$

$$\Delta_z = \frac{B_2}{2B_0} b$$

$$a = a_L - \sqrt{\Delta_R^2 + \Delta_z^2}$$

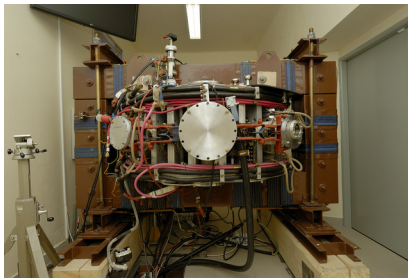
$B_1 = mc_3 - mc_1$, $B_2 = mc_4 - mc_2$, $B_0 = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi b}$, \bar{B}_z je průměrné vertikální pole

PRO: zvýšení přesnosti – oprava 1. řádu v ε

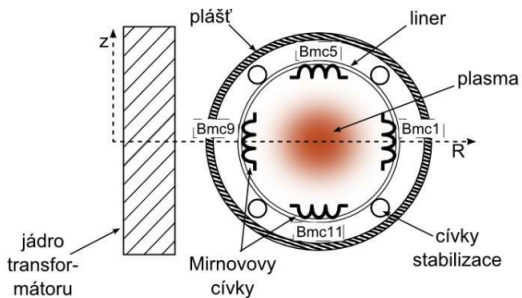
PROTI: časová náročnost – jedná se o iterační algoritmus
 vstupních data – nutnost minimálně 6 vstupních parametrů

Tokamak GOLEM

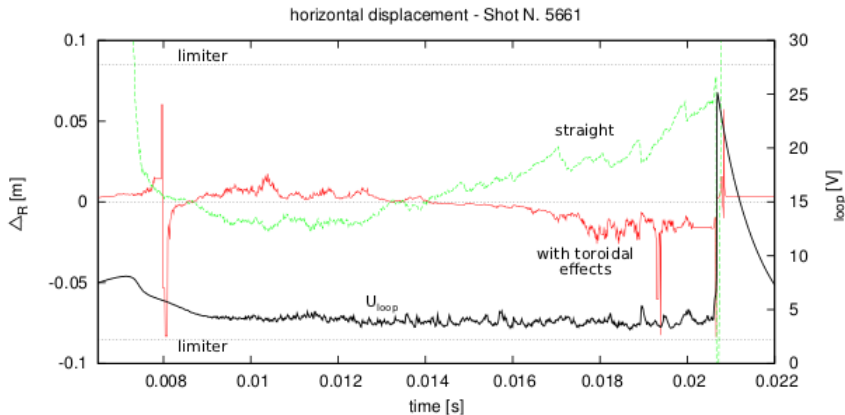
- kruhový průřez plazmatu
- železné jádro transformátoru
- měděný plášť

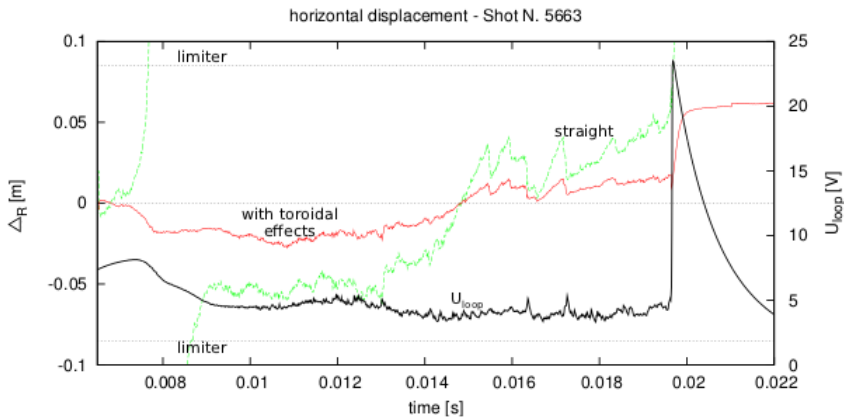


- měření poloidálního a vertikálního pole



NAMĚŘENÁ DATA





$$\Lambda = \left(\frac{B_1}{2} - \bar{B}_z \right) \frac{R_0}{B_0 b} - \ln \frac{b}{a} + 1$$

$$\Delta_R = \frac{B_1}{2B_0} b - \frac{1}{2} \left[\ln \frac{a}{b} - 1 + (\Lambda - 1/2) \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right) \right] \frac{b^2}{R_0}$$

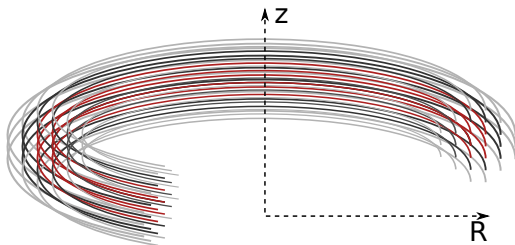
$$\Delta_z = \frac{B_2}{2B_0} b$$

$$a = a_L - \sqrt{\Delta_R^2 + \Delta_z^2}$$

$B_1 = mc_3 - mc_1$, $B_2 = mc_4 - mc_2$, $B_0 = \frac{\mu_0 l_p}{2\pi b}$, \bar{B}_z je průměrné vertikální pole

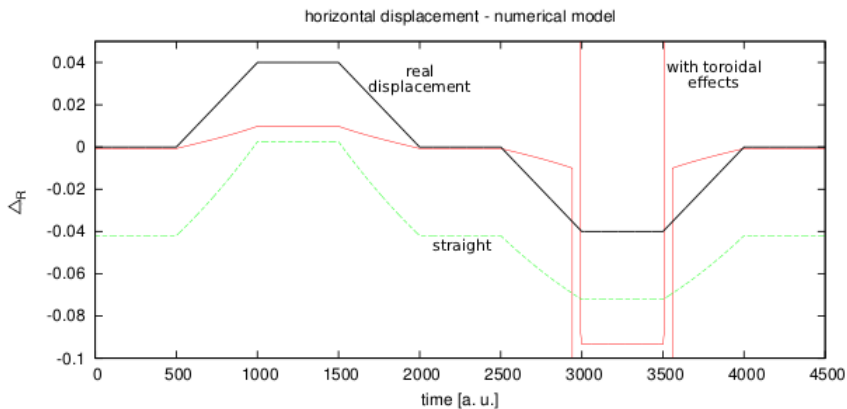
NUMERICKÝ MODEL

- numerický model založený na Biot-Savartově zákoně
$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_I \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{R^3}$$
- proudové vlákno rozděleno na 10000 částí
- plazma simulováno jako 400 proudových vláken s kvadratickým profilem proudu



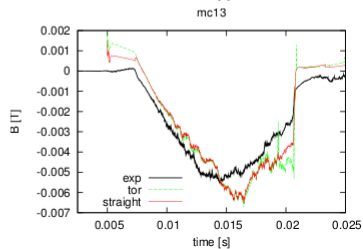
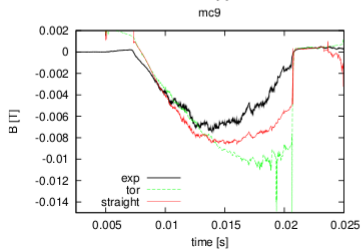
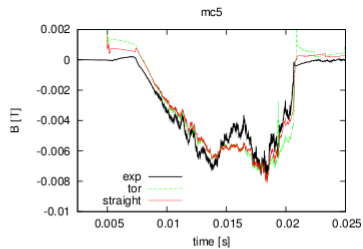
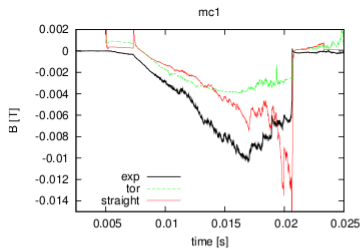
- magnetické pole měřeno na stejných místech jako na tokamaku GOLEM

- simulace změny polohy plazmatu \Rightarrow změna průměru prstence - 0,36 - 0,44 m
- proud plazmatem $I = 2500\text{A}$

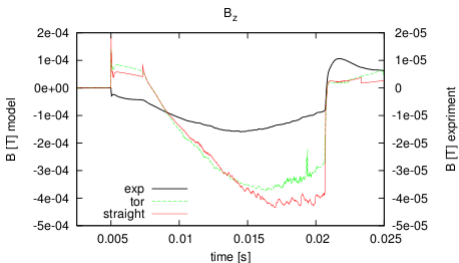


Porovnání s experimentem:

- experimentální data z výšřelu č. 5661
- poloha plazmatu vypočtena pomocí obou metod
- poloha plazmatu a proud plazmatem dosazeny do modelu
- data z modelu porovnány s experimentálními daty



Problém s vertikálním magnetickým polem – rozdíl jednoho řádu!



Možné příčiny rozdílu experimentálních dat a modelu

- měření vertikálního magnetického pole (v experimentu nebo v modelu)
- kovové jádro transformátoru
- v modelu není zahrnut měděný plášť

ZPĚTNOVAZEBNÍ ŘÍZENÍ POLOHY

Úkol:

- řídit polohu plazmatu, aby nedošlo ke kontaktu se stěnou
- prodloužit doby výboje

Části systému:

- sběr dat a jeho zpracování
- proudový zdroj
- magnetický kvadrupól

PCI karta s AD/DA převodníkem

- National Instruments PCI-6251 – 16 vstupních kanálů, 2 výstupní, 16-bit, 1,2 MS/s

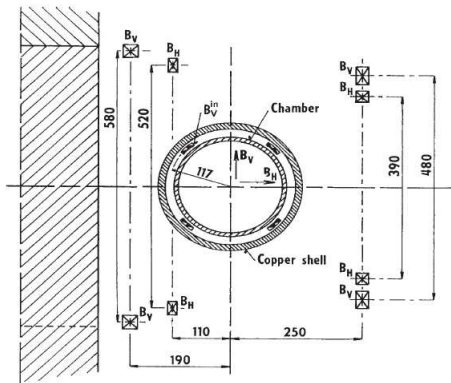


- Oficiální ovladače pro Windows – LabView
- Neoficiální ovladače pro Linux – comedi

Proudový zdroj

- zdroj ovládaný PCI kartou, maximální proud 500 A

Magnetický kvadrupól



- horizontální magnetické pole pro řízení vertikální polohy
- vertikální magnetické pole pro řízení horizontální polohy
- vnitřní magnetický kvadrupól pro měření vertikálního magnetického pole

Problémy:

- nutnost integrace signálu ze všech diagnostik – nutná minimální rychlost sběru
- drift při numerické integraci
- modularita ovladačů comedi – nemožnost jejich jednoduché úpravy
- nedostatečná rychlost komunikace mezi PCI kartou a počítačem
- proudový zdroj zatím nefunguje

Shrnutí

- při určení polohy plazmatu nelze zanedbat toroidální efekty
- problém s určením vertikálního magnetického pole v tokamaku nebo v modelu

Děkuji za pozornost