

Magnetohydrodynamické studie na tokamaku GOLEM

A. Hrnčířík, M. Grof, V. Oupický, J. Žák, T. Lamich

Masarykovo gymnázium Vsetín, Vsetín
Gymnázium Christiana Dopplera, Praha
Gymnázium Nymburk, Nymburk
Gymnázium Brno, třída Kapitána Jaroše 14, Brno
Mendelovo gymnázium, Opava

adam.hrncirik@menza.cz

mates.grof@gmail.com

voj.oup@gmail.com

jirizak1@seznam.cz

tlamic@klikni.cz

Abstrakt:

Tato práce se věnuje problematice studií magnetohydrodynamických (MHD) struktur plazmatu na tokamaku GOLEM, specificky magnetických ostrovů. V rámci práce bylo zanalyzováno několik výstřelů odlišného bezpečnostního faktoru a studováno spojení mezi touto veličinou a fluktuacemi magnetického pole generovaného proudem plazmatu. Dále byla analyzována prostorová struktura fluktuací reprezentativního výstřelu a z ní vyvozeny závěry o jejím charakteru.

1 Úvod

V tokamakovém plazmatu teče proud, který je společně se silným toroidálním magnetickým polem důležitý pro udržení plazmatu. Obr. 1a popisuje neporušené rozložení tohoto proudu, zatímco obrázek 1b zobrazuje jeho prostorově periodickou poruchu. Ta se projeví přítomností poruch magnetického pole, které je generovaného tímto proudem. Tyto poruchy berou formu tzv. magnetických ostrovů, které zapříčiňují zhoršení parametrů plazmatu uvnitř ostrovů, což může vést až k zániku plazmatu. Tyto ostrovy mohou být detekovány jako fluktuace magnetického pole generovaného plazmatem, přičemž výskyt a tvar poruch závisí na globálních parametrech plazmatu. Tento vztah je blíže popsán v sekci 2 a jeho platnost prozkoumána v sekci 3. Závěry jsou shrnuty v sekci 4.

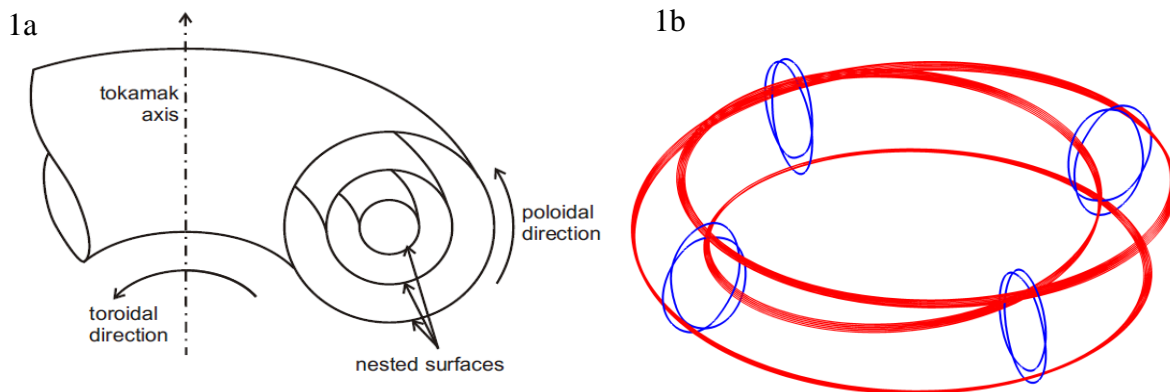
2 Teorie a metodika měření

Důležitou veličinou je bezpečnostní faktor (safety factor – q), což je poměr kolikrát indukční čára magnetického pole oběhne toroidální směr při jednom oběhnutí poloidálního směru (viz Obr 1 b) a jeho hodnota na okraji plazmatu, když se nachází vprostředku komory, se spočte jako:

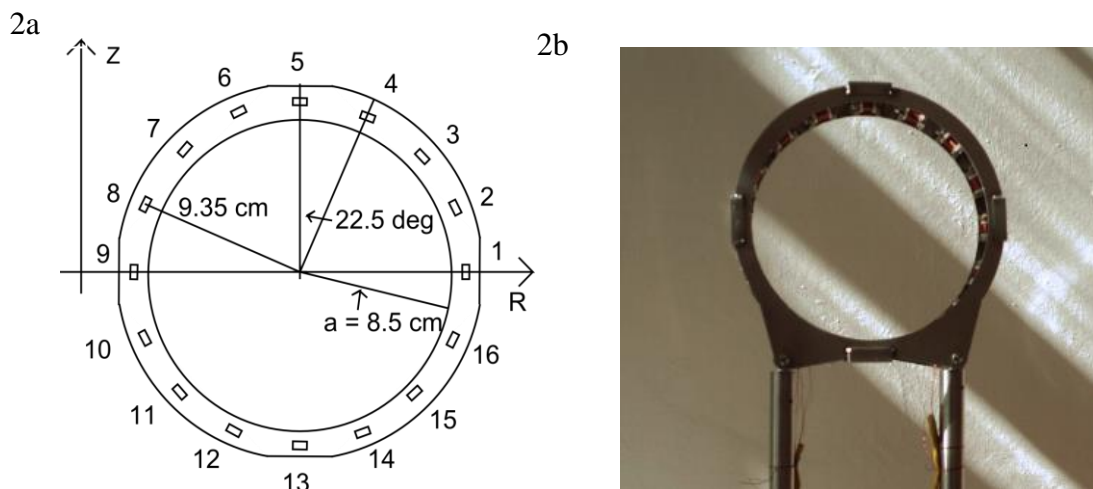
$$q = \frac{2\pi a^2}{R_0 \mu_0} \frac{B_T}{I_p} = C \frac{B_T}{I_p}$$

kde a je poloměr plazmatu, R_0 je velký poloměr, B_T je indukčnost magnetického toroidálního pole, I_p je proud plazmatu a μ_0 je permeabilita vakua. q závisí na 2 základních veličinách: B_T a I_p (jak je zmíněno ve vzorci nahoře). A také se mění v závislosti na vzdálenosti plazmatu od okraje komory. Hodnota q se mění v závislosti na poloze bodu v plazmatu, přičemž na okraji nabývá nejvyšších hodnot. Magnetické ostrovy se vyskytují v místech plazmatu, kde q se rovná podílu dvou malých celých čísel (1, 2, 3, 4). V případě že q na okraji je blízké některé z těchto hodnot, tak jsou ostrovy dobře detekovatelné, protože jsou na okraji plazmatu.

Pomocí soustavy detekčních cívek (obr. 2 a, b) se měřila vysokofrekvenční fluktuace lokálního magnetického pole. Na izolaci fluktuací byly digitálním filtrem odstraněny frekvence nižší než 2 kHz. V první fázi měření se studovala souvislost bezpečnostního faktoru (globálních parametrů výboje) s amplitudou fluktuace na cívce č. 5. Ve druhé fázi se s použitím všech 16 cívek studovala prostorová struktura fluktuací.



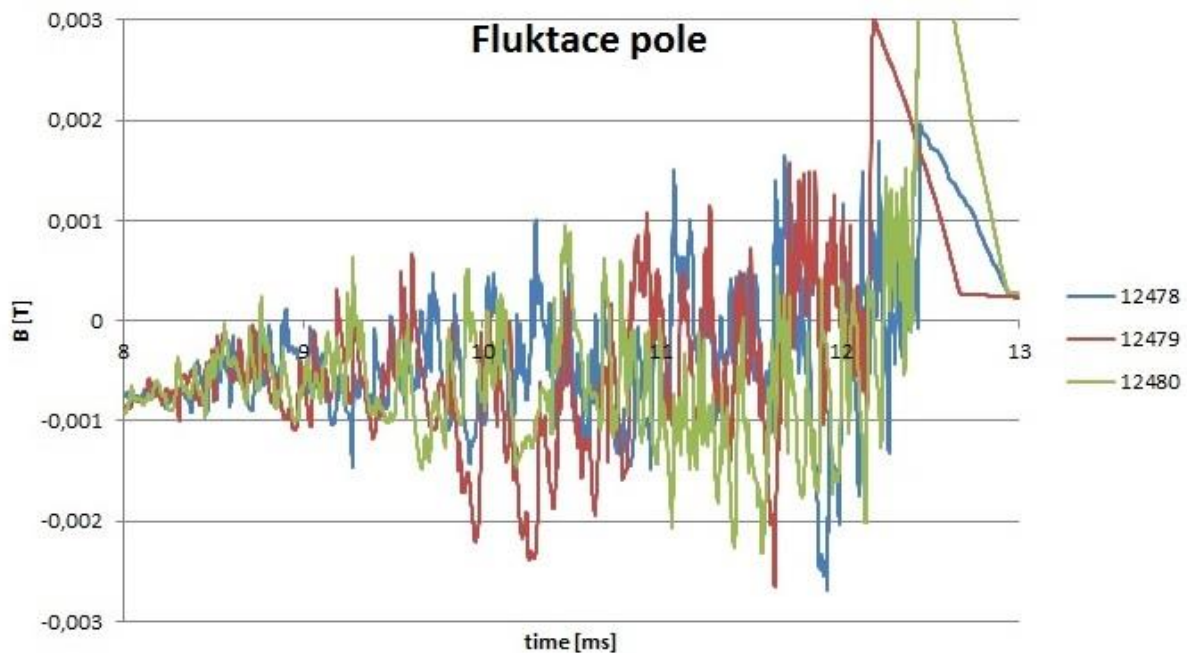
Obr. 1: a) Profil neporušeného rozložení proudu v plazmatu [1]; b) Periodická porucha proudu sledující zakřivení magnetických indukčních čar



Obr. 2: a) rozložení cívek po obvodu průřezu tokamaku; b) detekční cívky

3 Výsledky a diskuze

Vztah mezi fluktuacemi pole a bezpečnostním faktorem



Obr. 3: Vývoj fluktuací tří výstřelů se stejným bezpečnostním faktorem

V rámci měření byla provedena série 3 výstřelů se stejným bezpečnostním faktorem (globálním nastavení tokamaku) a byl analyzován průběh fluktuací. Graf na obrázku č. 3 zobrazuje, že při stejném bezpečnostním faktoru (obr. 4) je průběh fluktuací značně podobný jak z hlediska amplitudy fluktuací, tak i časového vývoje.

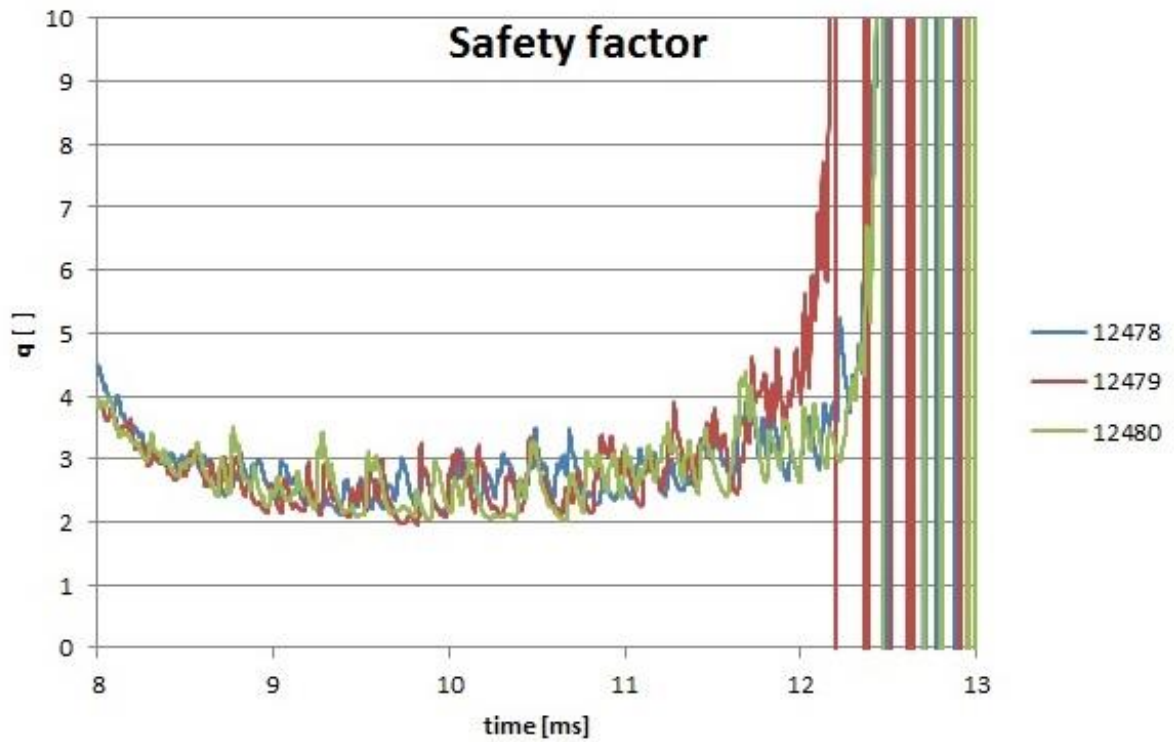
V rámci dalšího měření byly provedeny dva výstřely s odlišným bezpečnostním faktorem (viz obr. 5). Z obrázku č. 6 je pozorovatelný značný rozdíl časového i amplitudního průběhu sledovaných fluktuací.

Z obrázků č. 3 – 6 je patrné spojení velikosti bezpečnostního faktoru s mírou fluktuací, to implikuje, že jsou charakteru uspořádaných MHD struktur.

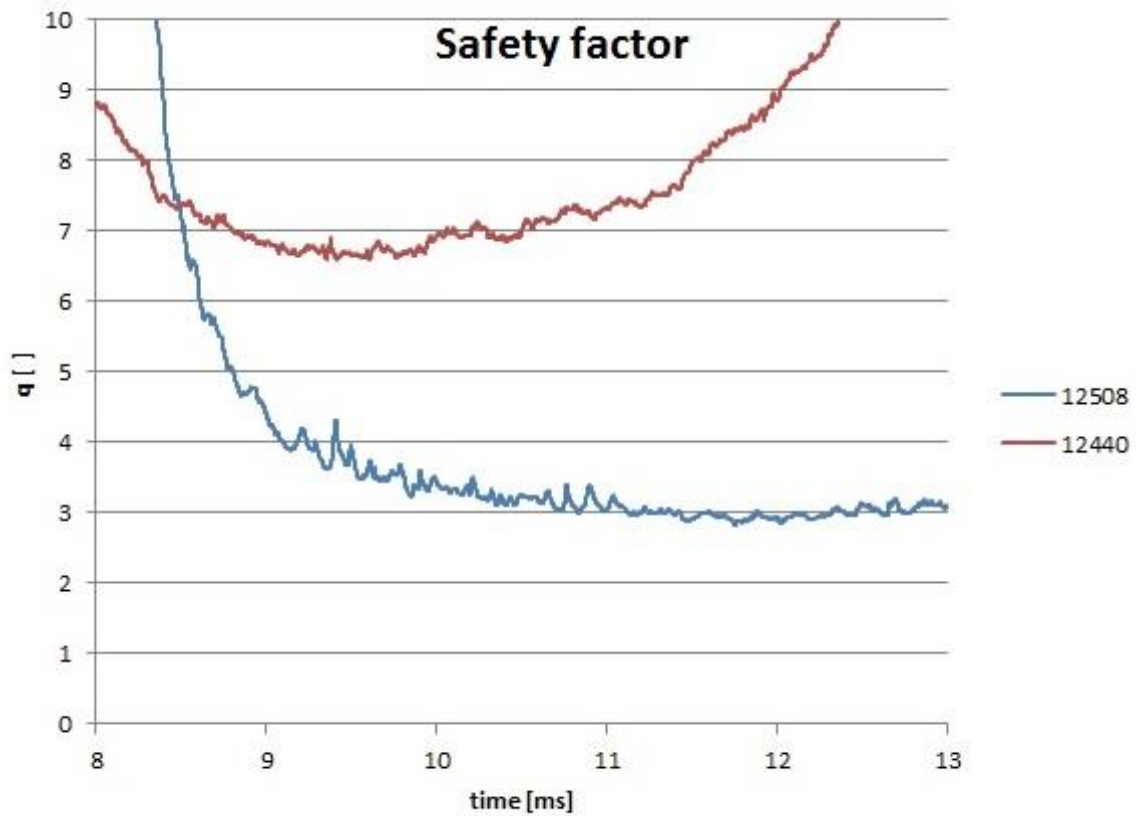
Prostorová a časová struktura fluktuací

Pro bližší prozkoumání detekovaných struktur jsme se zaměřili na relativně krátký časový úsek fluktuací, viz obrázek č. 7. Pro něj byla zpracována data ze všech 16 cívek.

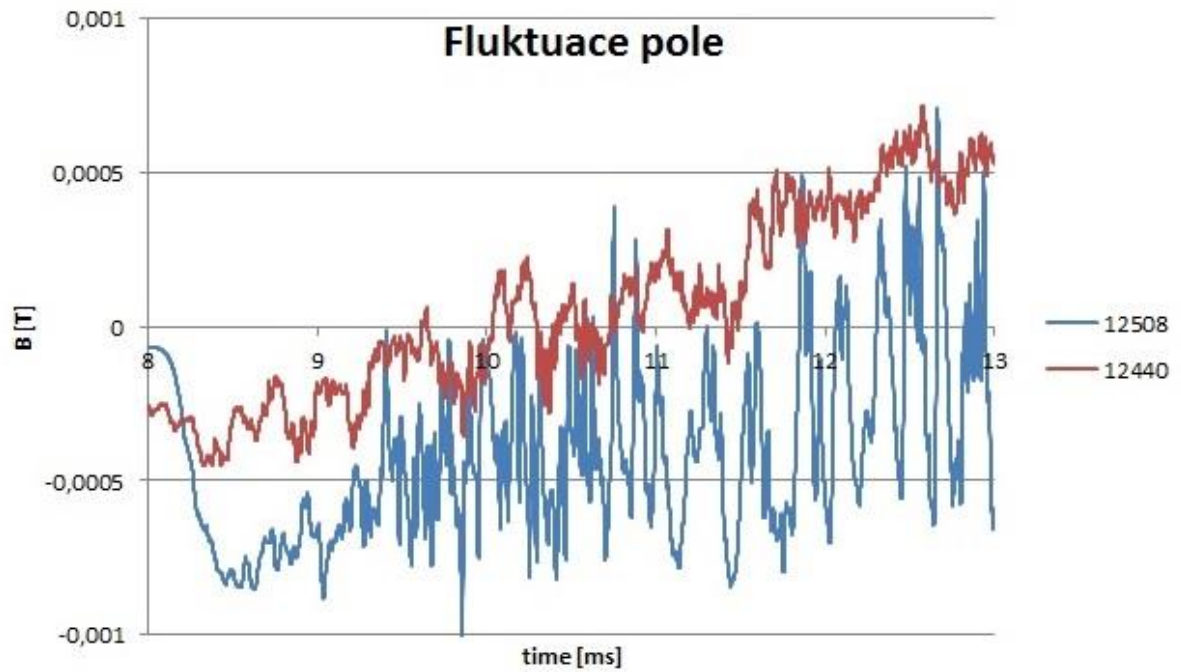
Je patrné, že tento průběh fluktuací při jednom časovém okamžiku zobrazuje magnetický ostrov s periodicitou tři, protože v každém časovém okamžiku jsou z obrázku zřetelné 3 maxima a minima fluktuace. V každém bodě při časovém průběhu je pozorovatelný, již zmíněný harmonický průběh fluktuací zapříčiněný rotačním pohybem ostrovů. V pozorovaném intervalu se hodnota bezpečnostního faktoru pohybovala kolem $q = 3,86$. Z toho lze vyvodit, že magnetický ostrov rotuje u okraje plazmatu.



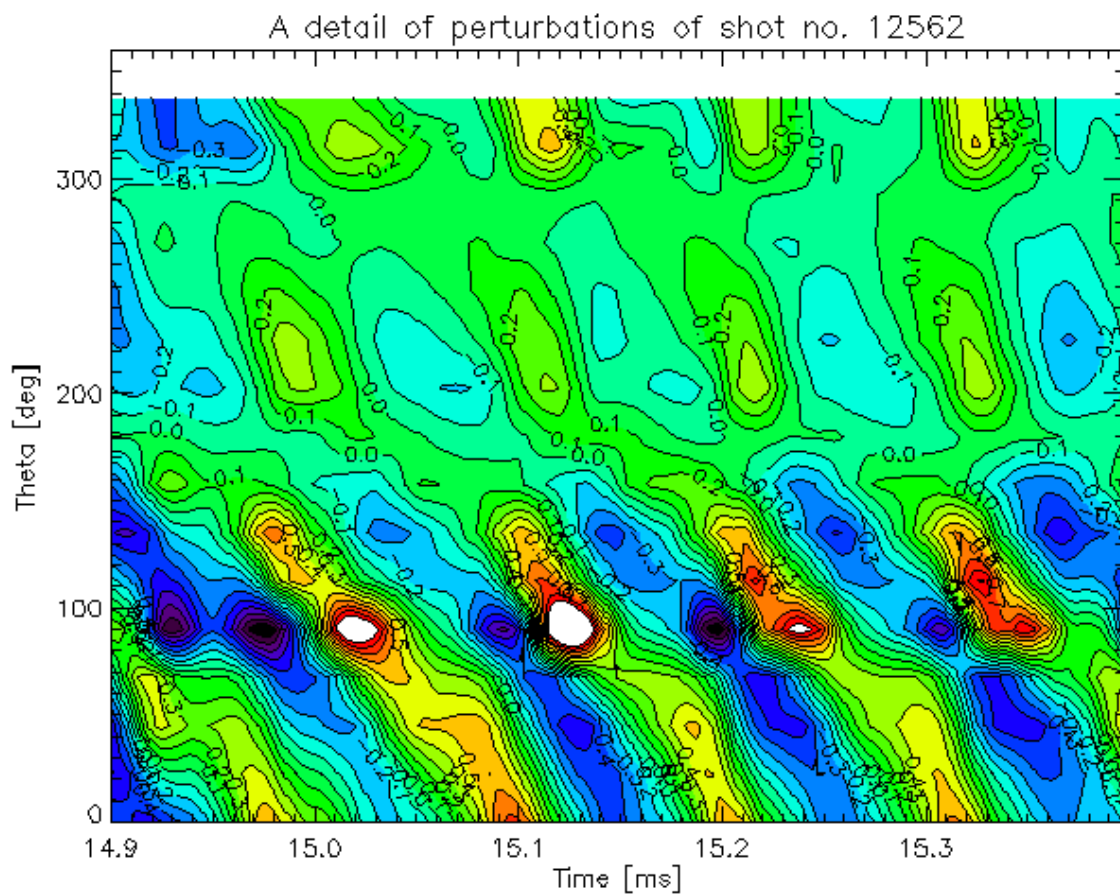
Obr. 4: Vývoj bezpečnostního faktoru tří stejných výstřelů v čase



Obr. 5: Vývoj bezpečnostního faktoru pro dva výstřely s různým globálním nastavením



Obr. 6: Fluktuace pro bezpečnostní faktor z obr. 5



Obr. 7: Časový vývoj fluktuací podél celého poloidálního obvodu za použití všech 16 cívek

4 Závěr

Při analýze tří výbojů se stejným bezpečnostním faktorem jsme pozorovali, že fluktuace magnetického pole generovaného plazmatem mají stejnou amplitudu a vývoj v čase. Také bylo pozorováno, že při výbojích s vysokým bezpečnostním faktorem je amplituda zřetelně nižší. Při výbojích s nízkým bezpečnostním faktorem je amplituda fluktuace výrazná. Při pozorování vývoje fluktuací v čase je patrná jejich periodičnost. Pozorujeme-li fluktuace na všech 16 cívkách najednou, pak vidíme, že tato periodičita je způsobena rotací magnetických ostrovů. Jelikož je existence magnetických ostrovů vázána na nižší hodnoty bezpečnostního faktoru, tak u pokusů s vysokým bezpečnostním faktorem jsou fluktuace pole nižší.

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat FJFI ČVUT za pořádání Týden vědy, především pak našemu supervizorovi Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za poskytnutí techniky a zázemí, dále garantovi našeho projektu Ing. Tomáši Markovičovi a všem pořadatelům.

Reference:

- [1] BROTÁNKOVÁ J.: *Studium horkého plazmatu v experimentálních zařízeních typu tokamak*, Doktorská disertace, Katedra povrchů a plazmat, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Karlova universita v Praze, 2009