

Polohové studie chování plazmatu na tokamaku GOLEM

Jan Priessnitz, Gymnázium, Brno, tř. Kpt. Jaroše 14, honya121@gmail.com

Štěpán Balázik, Gymnázium, Brno, tř. Kpt. Jaroše 14, sbalazik@gmail.com

Adam Vyjídák, Gymnázium, Olomouc, Čajkovského 9, avyjidak@gmail.com

Abstrakt

Hlavním cílem našeho projektu bylo studování chování plazmatu takovým způsobem, abychom byli schopni značně ovlivnit délku jeho životnosti. V našich experimentech jsme důkladně analyzovali základní charakteristiky cívek obklopující tokamak, díky nimž jsme byli schopni v reálném čase ovlivnit pohyb proudícího plazmatu. Výsledná korekce směru plazmatu zapříčinila změnu v délce jeho trvání, což je jeden ze základních parametrů pro úspěšnou termojadernou fúzi.

1 Úvod

V průběhu dvou dnů se naše skupina zabývala polohovým chováním plazmatu na tokamaku GOLEM. Samotný koncept tokamaku byl prezentován Sovětským svazem již v 50. letech minulého století, přičemž konstrukce jeho vylepšených verzí probíhá i v současnosti. Při jeho zrodu se zejména myslelo na to, aby jeho funkce předčili veškeré ostatní způsoby získávání energie – schopnost vést kontrolovanou jadernou fúzi se jeví jako jedno z nejlepších řešení, jak ukončit již započatou energetickou krizi.

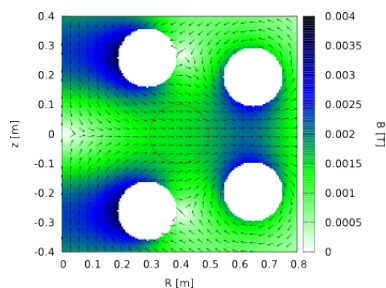
2 Motivace

Cílem tokamaku je ohřátí a udržení plazmatu na takové hodnoty, aby mohlo dojít k termojaderné fúzi. Teploty potřebné k uskutečnění takovéto reakce dosahují až sta miliónů K, což znamená, že použití jakýchkoliv materiálů k separaci plazmatu není možné. Vzhledem k naší pozemské situaci je možné plazma oddělit pouze jedním způsobem, a to pomocí elektromagnetické síly. Díky velké experimentální snaze fyziků se ukázalo, že správná optimalizace a konfigurace systémů k realizování termojaderné fúze je značně obtížná, ne-li nemožná. Naším úkolem však bylo zajistit zkoumání chování plazmatu takovým způsobem, aby se v budoucích experimentech usnadnila a snad i vyplnila vize termojaderné fúze.

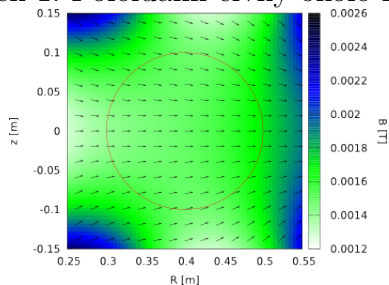
3 Stavba tokamaku

Hlavní částí tokamaku je toroidní komora, v níž je udržováno vakuum. Do této se posléze napouští plyn, který vytvoří plazma (jedná se buď o směs deuteria a tritia či pouze o

vodík). Tato komora je svou podstatou sekundárním vinutím v transformátoru, který má pouze jeden závit – první obvod má standartní charakteristiku a při výboji kondenzátoru generuje v komoře velké proudy. Proud v plazmatu vytváří kolem sebe pole, které interaguje s elektromagnetickým polem toroidálních cívek. Tato interakce dvou polí zapříčiní šroubovicový pohyb plazmatu. Pohyb dále můžeme ovlivňovat ve vertikálním směru díky poloidálním cívkám. Tyto cívky zajišťují delší životnost plazmatu. Jeden z našich hlavních úkolů zahrnoval právě správnou manipulaci s poloidními cívkami, což vedlo ke stabilizaci plazmatu.



Obrázek 1: Poloidální cívky okolo komory



Obrázek 2: Magnetické pole v komoře je homogenní

4 Tokamak GOLEM

Tento tokamak spadá svými rozměry do kategorie malých tokamaků. V současné době se nachází v jedné z budov ČVUT, přičemž slouží k výhradně edukativním účelům. Jeho vznik spadá do 60. let minulého století a byl jedním z prvních výtvarů svého druhu v tehdejší Sovětském svazu. Své místo a název změnil tento tokamak roku 1976, kdy se se přesunul z Moskvy do Prahy a své tehdejší označení TM-1 bylo přeměněno na CASTOR. Poslední změna identifikace a přesun proběhl roku 2007, kdy se dostal na FJFI a byl příhodně podle jedné z okolních tradic pokřtěn na tokamak GOLEM. Jako pracovní plyn používá tokamak GOLEM vodík; hlavní poloměr činí 0,4 m, malý poloměr činí 0,1 m. Maximální velikost magnetického pole zde dosahuje 0,8 T a tlak komory klesá řádově na desetitisíciny Pa.

5 Teorie

Mirnovovy cívky měří změnu magnetického pole. Pokud známe původní hodnotu a všechny předchozí změny, můžeme podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce vypočítat

intenzitu magnetického pole

$$U_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$\Phi_n = \sum_{i=1}^n -U_{ind} \cdot \Delta t$$

Sílu magnetické indukce můžeme vypočítat přes sílu magnetického pole, změnu času a efektivní plochu cívky

$$B_n = \frac{\Delta t}{S} \cdot \sum_{i=0}^n \Delta U_{ind}$$

Vychýlení plazmatu od středu spočteme přes intenzitu magnetické indukce spodní a horní Mirnovovy cívky

$$a = d \cdot \frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2}$$

Podle vychýlení můžeme korigovat polohu plazmatu.

6 Popis experimentu

Celkem bylo námi na tokamaku prostřednictvím webového rozhraní provedeno 24 výstřelů s pokaždé stejnými základními parametry. Na toroidálních cívkách bylo napětí 1300 V a na primární cívce transformátoru spouštěné s 15ms zpožděním 700 V. Tlak v komoře byl 24 mPa. Jako první bylo provedeno několik referenčních výstřelů bez jakýchkoliv korekcí. V průběhu dalších výstřelů se poloha plazmatu měřená Mirnovovými cívkami v komoře tokamaku korigovala pomocí cívek poloidálních s proudem až 300 A. Tyto korekce byly prováděny buď v reálném čase nebo předem připraveným průběhem proudu v poloidálních cívkách. Korekcí v reálném čase je dosaženo algoritmem připraveným v programu LabView a je možno měnit proud v koloidálních cívkách v závislosti na aktuální poloze plazmatu. Tohoto bylo využito při experimentech s lineární, kvadratickou a kubickou závislostí. Ruční příprava průběhu proudu probíhala pomocí webové aplikace naprogramované garantem našeho projektu Jindřichem Kocmanem a umožnila ještě před výstřelem připravit takový průběh proudu, který reagoval na pravidelnosti v sledované poloze plazmatu.

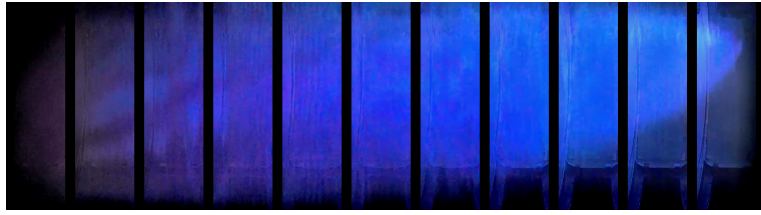
7 Výsledky

S korekcí v reálném čase

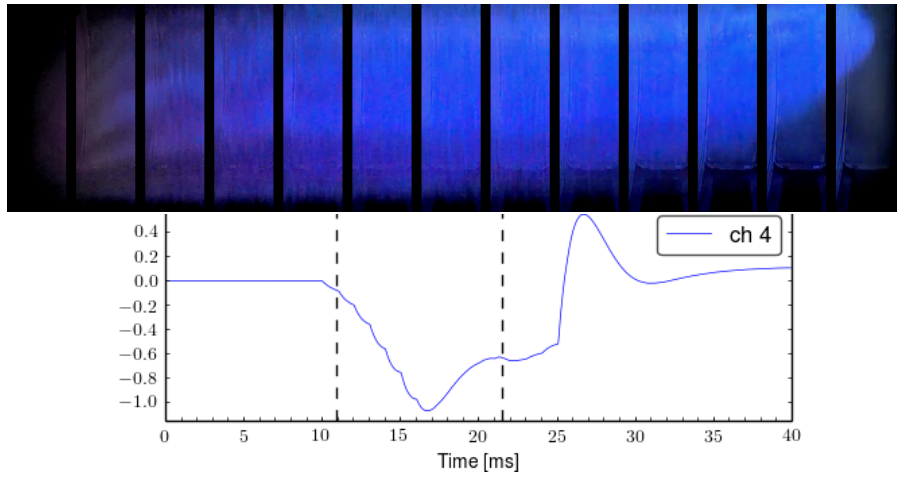
Největší životnost plazmatu byla dosažena při lineární závislosti proudu v poloidálních cívkách na vychýlení plazmatu od středu. Na rozdíl od kvadratické nebo kubické závislosti nesnižuje proud u nízkých hodnot vychýlení, takže zkoriguje plazma už při malých vychýleních. Největší životnost plazmatu při korekci v reálném čase byla 9,9 ms.

S ruční korekcí

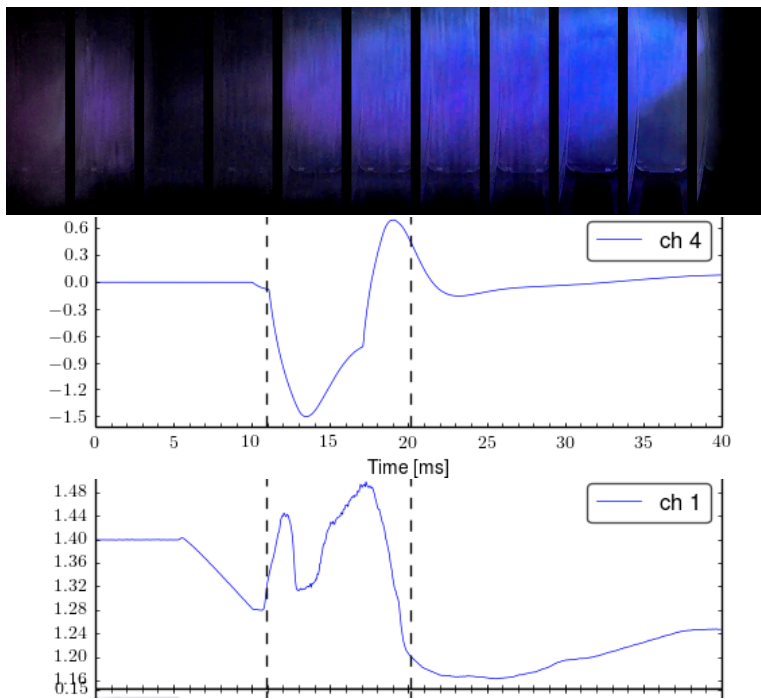
Na jednotlivých obrázcích je vidět poloha plazmatu při jednotlivých výstřelech. Grafy pod nimi znázorňují proudy v poloidálních cívkách, které korigují polohu plazmatu.



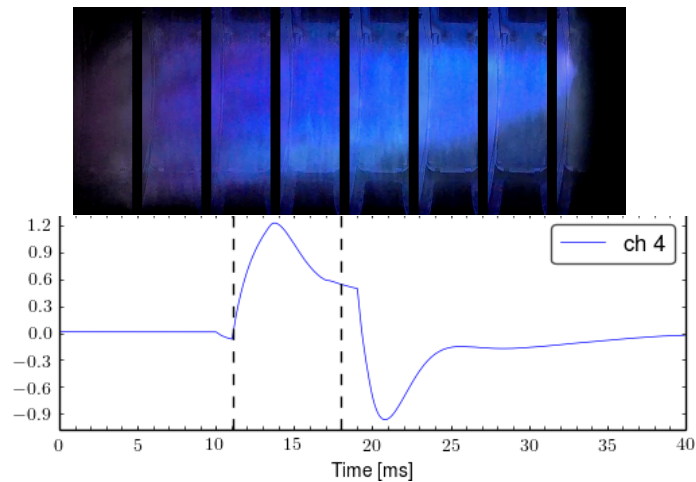
Obrázek 3: Výstřel bez korekce. Životnost plazmatu byla 9,5 ms. Plazma se bez korekce pohybovalo směrem nahoru.



Obrázek 4: Výstřel s korekcí. Životnost plazmatu byla 10,6 ms, tedy největší dosáhnutá životnost. Síla tlačící plazma dolů se postupně zvyšovala.



Obrázek 5: Výstřel s korekcí. Korekční síla začala ihned po průrazu působit směrem dolů na plazma. Na obrázku a spodním grafu je vidět, že plazma narazilo na stěnu a zaniklo a znovu vzniklo.



Obrázek 6: Výstřel s korekcí. Korekční síla začne ihned působit na plazma směrem nahoru. Významně se tím snížila životnost plazmatu při stejných parametrech na 6,9 ms.

8 Závěr

Z výsledků práce je patrné, že se při stálých vstupních parametrech podařilo korigovat polohu a tedy i životnost plazmatu v tokamaku. Automatickým (počítačem řízeným) korekcím jsme se nemohli věnovat, protože tokamak nebyl v provozuschopném stavu, proto nebyla nalezena vhodná závislost mezi polohou plazmatu a mírou korekce.

9 Diskuze

Protože většina znalostí o pohybu plazmatu v tokamacích je ověřena pouze empiricky, nezbyvá než se zaměřit na zkoušení nových konfigurací tokamaku pro dosažení lepších výsledků. Například pro automatickou korekci polohy by bylo možné použít odmocninovou nebo logaritmickou závislost.

Poděkování

Děkujeme celému týmu tokamaku Golem. Především Bc. Jindřichovi Kocmanovi za odborné vedení a Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za podporu při práci s tokamakem.

Reference

- [1] Jindřich Kocman. Bakalářská práce. Master's thesis, CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE, 2010.
- [2] Students of CTU. Tokamak, 2014. <http://golem.fjfi.cvut.cz/?p=tokamak>.
- [3] Wikipedie. Tokamak tm-1 mh — wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2013. [Online; navštíveno 20. 05. 2014].