

Základy technologie stabilizace vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

Jiří Stříteský¹, Adam Selke², Nikola Zdeňková³

¹Gymnázium, Pardubice, Mozartova 449; jistrites@gmail.com

²Gymnázium J. K. Tyla, Hradec Králové; adam.selke@gjkt.cz

³Gymnázium Ludka Pika, Plzeň; nzdenkova@gmail.com

O. Garant Ing. Daniela Kropáčková; KF FJFI ČVUT

Abstrakt

Tokamak byl a nadále zůstává nejslibnějším zařízením pro získávání elektrické energie z termojaderné fúze, což je reakce, při které dojde ke sloučení dvou jader za extrémně vysokých teplot. Právě tokamaky využívají kombinaci magnetických polí, kterým vysokoteplotní plazma udržují v centru komory a zabraňují kontaktu se stěnou nádoby. My jsme se v našem projektu snažili docílit co nejdelší doby trvání výboje a to na vůbec nejstarším operujícím tokamaku GOLEM. V průběhu práce se nám podařilo docílit i výbojů s dvojitým průrazem, které jsme se rozhodli blíže analyzovat.

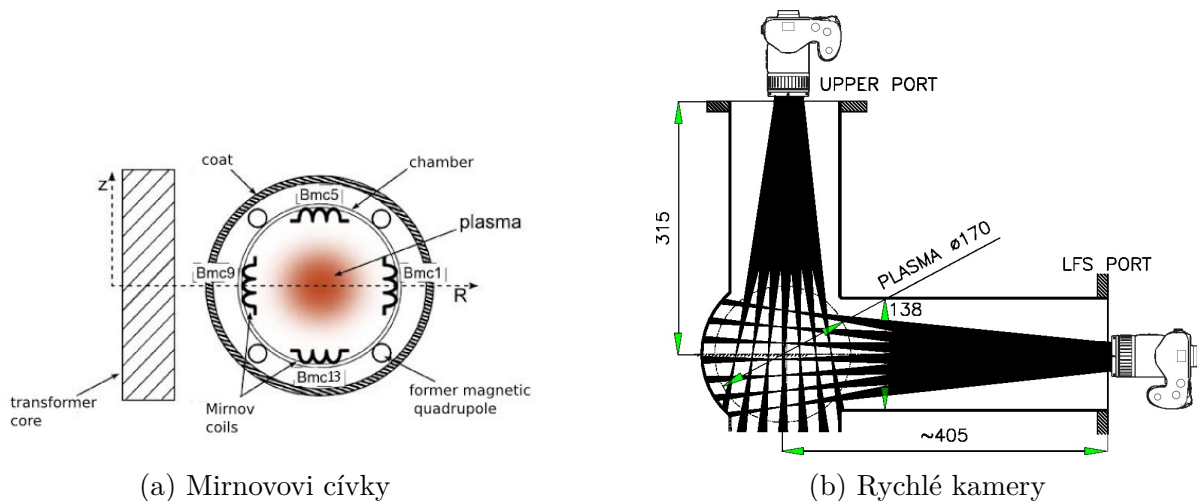
1 Úvod

Termojaderná fúze představuje potenciální zdroj elektrické energie. Pokud lidstvo dokáže úspěšně vytvořit termojaderný fúzní reaktor, o elektrickou energii již v podstatě nebude mít nouzi. Cílem výzkumu v této oblasti je tedy vybudování elektrárny, která bude efektivně produkovat elektrickou energii a nebude vytvářet škodlivé odpadní látky. Existují různé koncepty, které se většinou liší způsobem udržení plazmatu. Nejrozšířenějším z nich je právě tokamak, který k udržení plazmatu využívá kombinaci magnetických polí, jež drží plazma od stěn komory a stabilizují jej. V našich experimentech jsme se snažili udržet plazma ve středu komory pomocí úpravy proudu v cívkách horizontální a vertikální stabilizace. Zároveň jsme se tímto způsobem snažili o co největší prodloužení výboje.

2 Stabilizace plazmatu

2.1 Teorie

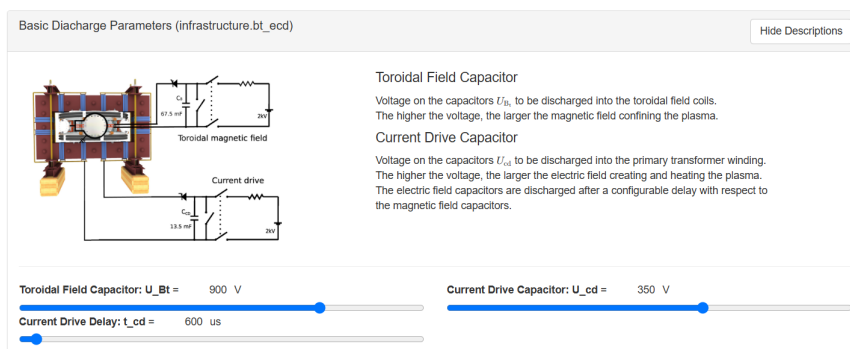
Tokamak GOLEM nacházející se na FJFI je tvořen vakuovou komorou kruhového průřezu a cívkami generující magnetické pole. Uvnitř je pomocí cívek vytvořeno toroidální magnetické pole. Změnou magnetického indukčního toku je v plazmatu indukován elektrický proud, který plyn zahřívá na několik stovek tisíc stupňů celsia. Extrémně horký ionizovaný plyn je poté různými silami vychylován. Změna jeho polohy může zmenšit jeho poloměr a nakonec vést až k zániku plazmatu nárazem o stěny.



Obrázek 1: Schéma umístění diagnostiky pro určování polohy plazmatu

2.2 Metody měření

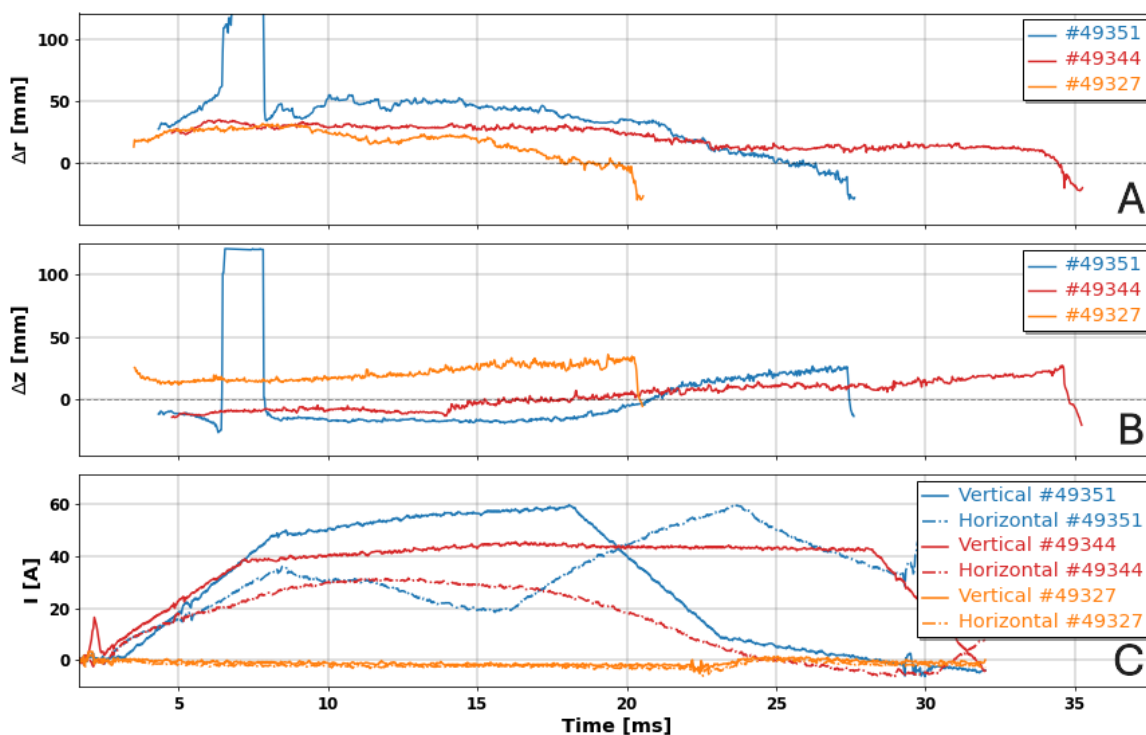
Samotný experiment jsme iniciovali přes webový velín (obrázek 2), který umožňuje nastavovat parametry výbojů (konkrétně se jednalo o napětí na kondenzátorech pro generaci toroidálního magnetického pole, U_{Bt} , pro generaci elektrického pole, U_{CD} , zpoždění se kterým se vybíjí kondenzátor pro elektrické pole, t_{CD} , tlak v komoře, p_{ch} , a předdefinovaný signál pro generaci proudu stabilizačními cívkami). Data získaná z experimentu jsme dále vyhodnocovali předem připraveným Python skriptem s využitím webové aplikace Jupyter notebook. Pohyb plazmatu byl měřen pomocí čtyř Mironovových cívek, které jsou umístěny v mezikruží ve stínu limiteru (obrázek 1a). Odchyly v poloze plazmatu můžeme naměřit ve dvou směrech: horizontálním - vlevo a vpravo od středu komory, vertikálním - nahoru a dolů. Jako další možnost kontroly polohy sloužily dvě rychlé kamery Photron MINI UX100. Jedna snímala plazma z boku komory (vertikální změny) a druhá z vrchu komory (horizontální změny), viz obrázek 1b. Posledním důležitým ukazatelem byla změna poloměru plazmatu. Ten jsme podle Pythagorovy věty vypočítali jako rozdíl původního poloměru a rozměru, který vznikl po složení vertikálních a horizontálních rozměrů.



Obrázek 2: Webový velín

2.3 Výsledky

Data vyhodnocená s využitím skriptu napsaného v jazyce Python jsme dále použili na zlepšení strategie udržení plazmatu v centru komory tokamaku. Pomocí změny proudu v stabilizačních cívkách tokamaku jsme negovali výchylky plazmatu od středu komory a prodlužovali tak délku výboje až na výsledných 31,27 ms. Tento výboj měl základní parametry $U_{Bt} = 900$ V, $U_{cd}=350$ V, $t_{cd} = 600 \mu s$ a $p_{ch} = 15$ mPa. Podařilo se nám také docílit dvojitého průrazu do plazmatu. Základní parametry tohoto výboje se lišily od našeho nejdelšího výboje pouze v tlaku, který činil 16 mPa. Oba grafy výbojů jsou na obrázku 3. Červeně - nejdelší, modře - dvojitý průraz a žlutě - referenční, bez stabilizace. Grafy jsou na obrázku postupně vykresleny pro horizontální polohu, vertikální polohu a v posledním je vykreslen průběh proudu ve stabilizačních cívkách. U modrého grafu v sekci A vidíme, že plazma prudce změnilo horizontální polohu a stejně tak v sekci B vertikální polohu, plazma tedy narazilo do stěny komory a zaniklo poprvé, ovšem v tokamaku byly vhodné podmínky i pro následný druhý průraz. U žlutého grafu v sekci A a B je vidět, že výboj bez stabilizace (viz sekce C, kde proud v cívkách je nulový) byl kratší oproti nejdelšímu výboji o 13,19 ms.



Obrázek 3: Grafy vybraných výbojů

2.4 Diskuze

Zapnutím stabilizace se nám podařilo prodloužit výboj z 18,08 ms na 31,27 ms. Oba výboje jsme prováděli po vyčištění komory, proto si myslíme, že nečistoty neměly tak negativní vliv na polohu a obecné parametry plazmatu. Dovolíme si tedy říct, že jsme dosáhli našeho primárního cíle, kterým bylo prodloužení doby trvání výboje. Při všech pokusech jsme prorazili, a to především díky dobře zvoleným základním parametrům výboje. Jediný základní parametr, který jsme se pokusili změnit, byl tlak plynu v komoře.

Provedli jsme výboje s tlakem 13 mPa a 14 mPa, které měly výrazně kratší dobu trvání než všechny naše ostatní pokusy, a proto jsme se rozhodli základní parametry, které se osvědčily, zachovat u výstřelů, ve kterých jsme se snažili dosáhnout delší doby trvání výboje.

3 Shrnutí experimentu

Úspěšně se nám podařilo zvládnout základy technologie stabilizace plazmatu a dovést náš nejdelší výboj až na délku 31,27 ms. Obecně jsme zhodnotili, že délka výboje mimo jiné záleží na vlivech uvnitř komory, které jsou těžko předvídatelné a lze je jen těžko ovlivnit. Samotná stabilizace je tak jednou z klíčových technologií k udržení plazmatu v tokamacích a jejím zdokonalováním se tak neustále přibližujeme k využití fúzní energie k produkci elektrické energie v budoucích fúzních elektrárnách.

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat panu Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za zorganizování skvělé akce, která nám umožnila nejen se vzdělávat a bádát, ale také si trochu užít a zkusit studentský život. Velmi si vážíme Vaší práce i energie co jste do akce vložil. Zvláštní poděkování pak patří naší garantce Daniele Kropáčkové za skvělé vedení, konzultace a pomoc na miniprojektu.

Reference

1. KOCMAN, J. *Řízení polohy plazmatického prstence na tokamaku GOLEM*. [B.r.]. Dostupné také z: https://physics.fjfi.cvut.cz/publications/FTTF/DP_Jindrich_Kocman.pdf.
2. MARKOVIČ, T. *Measurement of Magnetic Fields on GOLEM Tokamak*. [B.r.]. Dostupné také z: https://physics.fjfi.cvut.cz/publications/FTTF/DP_Tomas_Markovic.pdf.