

Základy technologie stabilizace vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

Březina Tomáš¹, Drexlerová Monika², Rostejský Adam³, Šimánek Vít⁴

¹Gymnázium Trutnov, ²Gymnázium Rožnov pod Radhoštěm,

³Jiráskovo gymnázium Náchod, ⁴Gymnázium Příbram

¹tomas.brezina551@gmail.com; ²drexlerova.monika@seznam.cz,

³wojdik32@gmail.com; ⁴vitek.simanek@gmail.com

Abstrakt

Ve fúzních elektrárnách budoucnosti budeme potřebovat, aby reakce mezi atomy vodíku v plazmatu probíhaly nepřetržitě. To, ale bude spíše záležitost sci-fi, dokud nevyřešíme základní problémy, které s tím souvisí. Mimo jiné, jde i o udržení stabilního plazmatu uvnitř komory, aby nepoškodilo vnitřek tokamaku a nezpůsobilo nevyčíslitelné škody. Právě stabilizací plazmatu (v podmínkách tokamaku GOLEM) jsme se zabývali a některé naše úspěšné výsledky (přesahující až dvojnásobek výchozích časů) přináší pozitivní vlnu naděje nejen nám, ale všem, komu fúzní energie v budoucnu pomůže.

1 Úvod

Tokamak již od doby jeho vzniku v 50. letech představuje velice atraktivní zdroj energie. Konec konců, odjakživa jsme ji sledovali na obloze, proto je vidina jejího komerčního využití silnou motivací pro vědce po celém světě. Vytvoření dlouhodobě pracující fúzní elektrárny by lidstvu přineslo téměř nevyčerpatelný zdroj ekologicky čisté energie. Ke spoutání této energie by nám mohl sloužit Tokamak - zařízení, které k udržení horkého plazmatu (až 100 milionů Kelvinů) používá magnetické pole. V průběhu reakce působí síly vychylující plazma. My jsme tyto výchylky změřili a pokusili jsme se je pomocí jiných magnetických polí minimalizovat, abychom dosáhli nejstabilnějšího plazmatu s nejdélsí dobou trvání výboje.

2 Stabilzace

2.1 Teoretický úvod

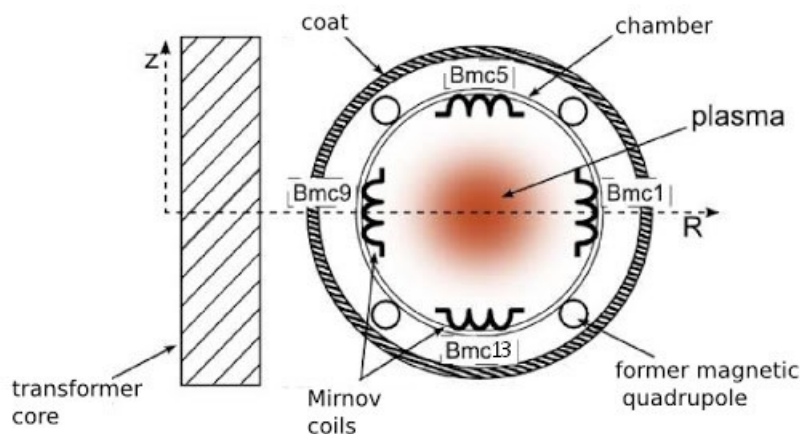
Tokamak Golem je tvořen vakuovou komorou tvaru prstence a cívkami okolo ní. Uvnitř je pomocí cívek vytvořeno toroidální magnetické pole. Změnou magnetického indukčního toku je v plazmatu indukován elektrický proud, který jej zahřívá na několik stovek tisíc stupňů. Extrémně horký ionizovaný plyn je poté různými silami vychylován. Změna jeho polohy zmenšuje jeho poloměr a vede k zániku plazmatu. Odchytky v poloze plazmatu

můžeme naměřit ve dvou směrech: radiálním - vlevo a vpravo, vertikálním - nahoru a dolů od středu komory.

Pohyb plazmatu jsme měřili pomocí čtyř **Mirnovových cívek**, které jsou rozmístěny v mezikruží ve stínu limiteru. Každá z cívek má 91 závitů a jejich středy se nachází 93 mm od centra komory. Umístění cívek je znázorněno na Obrázku 1. Signál z cívek bylo nejprve nutné zintegrovat, čímž jsme získali velikost poloidálního magnetického pole generovaného plazmatem pro 4 různá místa komory. Dále ještě bylo nutné eliminovat parazitní signál od toroidálního magnetického pole, což jsme provedli odečtením hodnot získaných z vakuového výboje. Pro změnu radiální polohy Δr a vertikální polohy Δz jsme použili vzorce:

$$\Delta r = \frac{B_{mc1} - B_{mc9}}{B_{mc1} + B_{mc9}} \cdot b \quad \Delta z = \frac{B_{mc5} - B_{mc13}}{B_{mc5} + B_{mc13}} \cdot b, \quad (1)$$

kde b je konstanta rovná 93 mm. Tyto vypočtené hodnoty jsme poté zanesli do grafů.



Obrázek 1: Schéma Mirnovových cívek měřící polohu plazmatu

Jako další možnost kontroly polohy sloužily **rychlé kamery** - konkrétně **Photron FastCam Mini UX50**, které v našem případě zaznamenávaly 40 000 FPS (snímků za sekundu). Jedna snímala plazma z boku komory (vertikální změny). Druhá z vrchu komory (radiální změny).

Posledním a nejdůležitějším ukazatelem byla změna poloměru plazmatu. Ten jsme podle Pythagorovy věty vypočítali jako rozdíl původního poloměru a rozměru, který vznikl po složení vertikálních a radiálních rozměrů:

$$a = a_0 - \sqrt{\Delta r^2 + \Delta z^2} \quad (2)$$

kde a_0 je 85 mm.

Po každém výboji jsme provedli analýzu naměřených dat (délka výboje, vývoj polohy) a na základě toho jsme pozměnili velikost a průběh proudu ve stabilizačních cívkách.

2.2 Výsledky

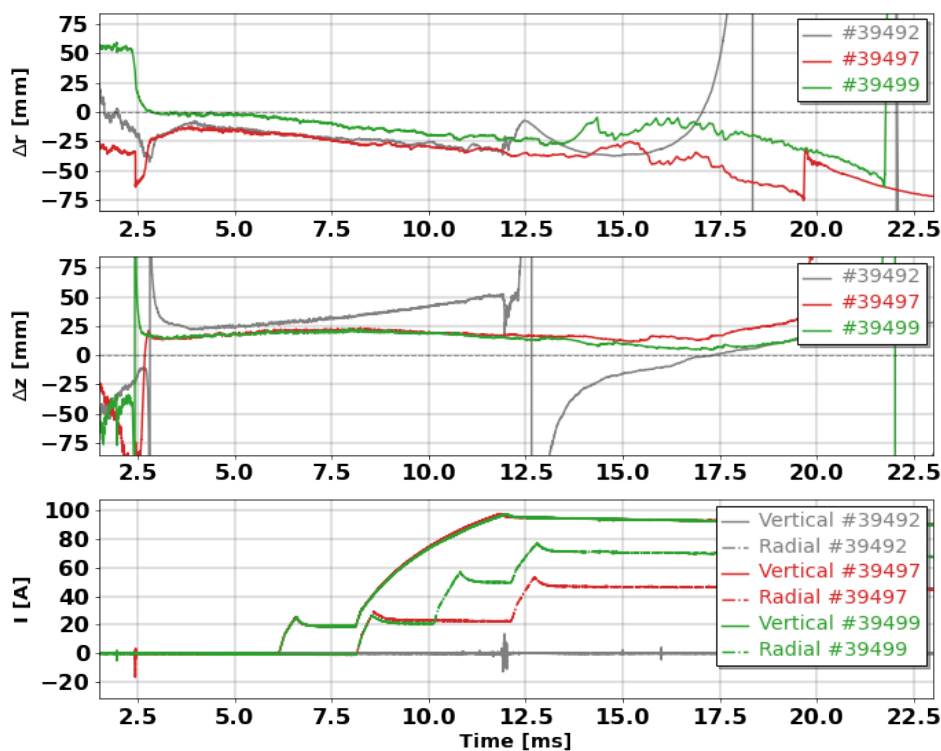
Celkově jsme na tokamaku GOLEM uskutečnili přes 25 výbojů. Získaná data jsme zanesli do tabulky, kde jsme sledovali nejen základní parametry jako napětí na kondenzátorech napájejících obvod pro generaci toroidálního magnetického a toroidálního elektrického

pole, které se vlastně neměnilo, ale hlavně změny na napětí na stabilizačních cívkách a čas, kdy se stabilizace zapnula.

Na grafu (Obrázek. 2) lze vidět záznamy z Mirnovových cívek pro výboje #39492, #39497 a #39499 s parametry viz Tabulka 1. Náhlé vychýlení polohy o více, než je maximální rozsah os (± 85 mm), signalizuje zánik plazmatu. První z výbojů (#39492) byl referenční, nebyl stabilizován a sloužil k tomu, abychom zjistili jak se plazma chová. U druhého výboje (#39497) jsme v čase postupně zvyšovali stabilizační proud. Dosáhl 16,94 ms. Třetí výboj (#39499) byl nejdelší, opět jsme v čase zvyšovali stabilizační proud, ale zvýšili jsme proud pro radiální stabilizaci, dosáhl 19,25 ms.

U_{Bt} [V]	U_{cd} [V]	T_{cd} [μs]	p [mPa]
1200	450	350	20

Tabulka 1: Standardní parametry výbojů.



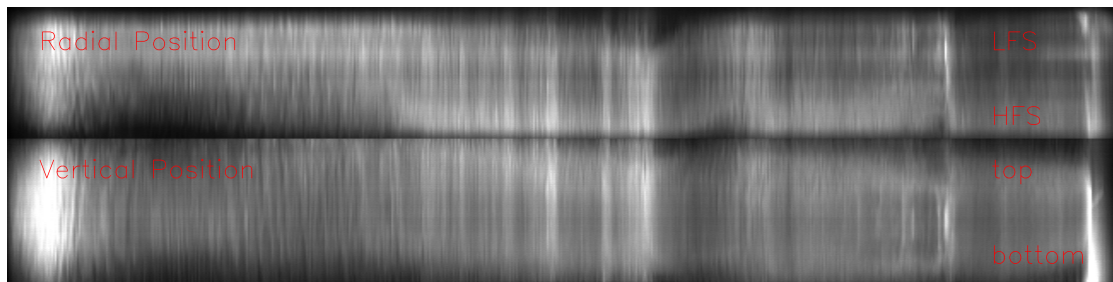
Obrázek 2: Závislost vertikální polohy Δz , radiální polohy Δr a proudu I na čase.

Na Obrázku 3 je vidět záznam z kamer sledující pozici plazmatu ve výstřelu #39493, který měl pouze vertikální stabilizaci a trval 15,84 ms.

2.3 Diskuze

Délka původního referenčního výboje se nám jen pomocí stabilizace povedla zdvojnásobit až na zmíněných 19,25 ms a dostali jsme se do bodu, kdy bychom plazma udrželi i déle, ale překážkou pro nás byla kapacita kondenzátorů, kvůli které nejsme schopní vést proud dostatečně dlouho. Snaha o prodloužení výboje se tedy celkově vydařila.

Ovšem velká část výstřelů byla nepovedená, z důvodů neprůrazu neutrálního plynu do plazmatu, nízkého tlaku, zhoršení parametrů komory. Také jsme museli čelit problémům s



Obrázek 3: Záznam z rychlých kamer ukazující časový vývoj polohy plazmatu. Z průběhu je patrný pozitivní vliv stabilizace na délku výboje.

předionizací, která po nějaké době přestala fungovat úplně. Rovněž v některých případech chyběly záznamy kamer. Jejich absence nám analýzu polohy silně zkomplikovala.

3 Shrnutí

Po několika pokusech na Tokamaku Golem jsme dosáhli velmi příznivých výsledků. Z původní délky výboje, 9,19 ms, jsme pomocí stabilizace dosáhli až 19,25 ms. Experiment dokázal, že máme ještě velký prostor pro vývoj a pokrok v tomto oboru.

Samotná stabilizace je jednou z klíčových technologií v budoucích elektrárnách a jejím zdokonalením se přiblížíme k využití fúzní energie na Zemi.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali ČVUT FJFI za poskytnutí výzkumných zařízení a organizátorům týdne vědy za příležitost si experiment vyzkoušet. Zvláštní poděkování pak patří naší garantce, Daniele Kropáčkové, za skvělé vedení, konzultace a pomoc.

Reference

- [1] H. J. Greenberg. *A Simplified Introduction to L^AT_EX*. <https://mirrors.nic.cz/tex-archive/info/simplified-latex/simplified-intro.pdf>.
- [2] *GOLEM wiki*. <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/>.
- [3] S. Entler, O. Ficker, et al. *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*. <https://www.ipp.cas.cz/miranda2/export/sitesavcr/ufp/ufp-v-mediich/Publications/Budoucnost-energetiky-jaderna-fuze.pdf>.