

Experimenty s dynamickou stabilizací plazmatu na tokamaku GOLEM

Jan Dobeš (Gymnázium Františka Palackého, Neratovice)¹

Jakub Kantner (Gymnázium Českolipská, Praha)²

Tomáš P. Mirchi (Gymnázium Františka Palackého, Neratovice)³

Peter Švihra (Gymnázium Jozefa Lettricha, Martin)⁴

Jakub Veverka (Gymnázium Jiřího Ortena, Kutná Hora)⁵

¹ honnzad@seznam.cz

² jkant@seznam.cz

³ tpmirchi@gmail.com

⁴ psvihra@gmail.com

⁵ j.vev@centrum.cz

ABSTRAKT

Termonukleární fúze je založena na slučování jader lehkých prvků na prvky těžší. Při této reakci se uvolní energie, proto se dá považovat za jeden z nejperspektivnějších energetických zdrojů budoucnosti. Nicméně stále existuje mnoho problémů, které je třeba vyřešit. My jsme se v našem miniprojektu zabývali dynamickou stabilizací radiální polohy plazmatu a snažili jsme se dosáhnout co nejdelšího výboje. Z experimentů jsme zjistili, kdy jsou podmínky pro výboj nejideálnější a kdy tedy dosahuje nejvyšší teploty a největší délky pulzu.

Úvod

Termojaderná fúze je proces, při kterém se slučují lehčí jádra atomů, vznikají těžší jádra, při čemž se uvolní velké množství energie. Tokamak je prozatím nejlepší a nejúspěšnější vědecký nástroj, ve kterém lze fúzi uskutečnit. Dá se tady dosáhnout velkých teplot, při kterých mají částice se stejným nábojem dostatečně velkou energii na to, aby překonaly odpudivé elektrostatické síly a sloučily se. Při dosahovaných teplotách látka přejde do čtvrtého skupenství hmoty, takzvaného plazmatu, což je umožněno vhodným prostředím (tokamak) a vhodnými počátečními parametry. V naší práci jsme pracovali na tokamaku GOLEM, kde jsme se věnovali dynamické stabilizaci plazmatu, což je nástroj sloužící k prodloužení doby výboje, a tím přispívá ke zefektivnění fúze.

1 Principy

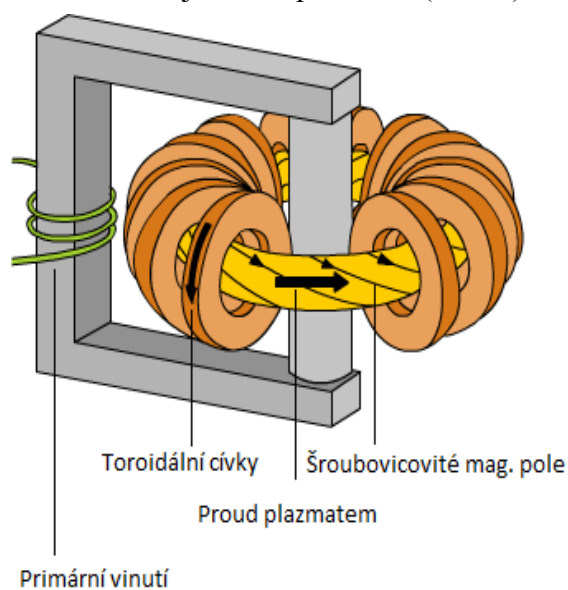
Princip a krátká historie tokamaků

Tokamak, jakožto zařízení, byl poprvé vytvořen v Sovětském svazu na konci 50. let. V tokamaku je plyn ionizován pomocí primárního vinutí cívek transformátoru. Plazma se v něm udržuje pomocí magnetických indukčních čar ve tvaru šroubovice, které jsou tvořeny kombinací toroidálních cívek, umístěných po obvodu vakuové nádoby, a poloidálním polem, tvořeným proudem v plazmatu (Obr. 1).

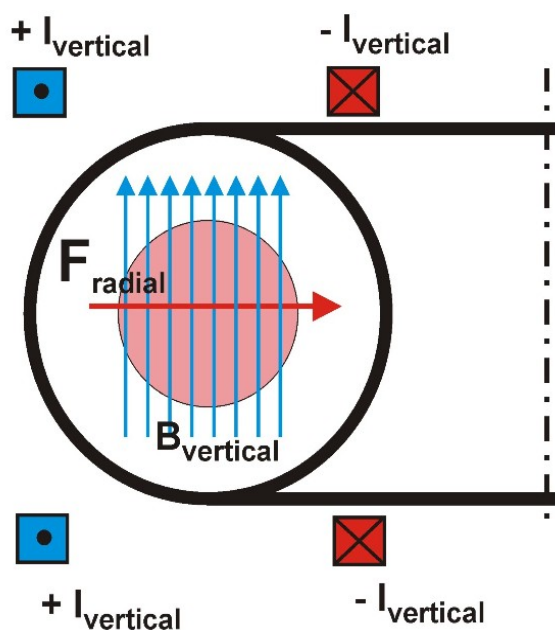
Princip dynamické stabilizace radiální polohy plazmatu

Zmiňované šroubovicové magnetické pole nedokáže úplně udržet plazma. Plazma kvůli Ampérově síle a kinetickému tlaku uniká směrem od středu na stěny komory. Proto se využívají další cívky, které jsou umístěny po obvodu tokamaku a pomáhají zlepšit stabilitu polohy plazmatu v radiálním směru. Tyto cívky vytváří kvadrupolové magnetické pole, které

má vertikální směr a jeho vektorový součinem s vektorem proudu plazmatu vzniká síla F , která zabraňuje úniku plazmatu (Obr. 2).



Obr. 1 Schéma tokamaku



Obr. 2 Schéma stabilizace radiální polohy plazmatu

2 Experiment

V naší práci jsme se pokusili zlepšit udržení plazmatu pomocí stabilizačních cívek umístěných po obvodu tokamaku v toroidálním směru. Při rozličných hodnotách napětí, které pustíme do stabilizačních cívek se mění jejich vliv na stabilitu plazmatu. Taktéž se tento vliv mění při změnách opoždění od začátku toroidálního magnetického pole, kdy se cívky zapínají. Neměli jsme předem žádné výchozí informace, díky kterým bychom zjistili, jaké budou tyto parametry, proto naše práce byla čistě experimentální. Chtěli jsme zjistit, při jakém napětí a zpoždění stabilizačních cívek dosáhneme nejlepšího zlepšení předem vybraného výboje bez stabilizace. Vybrali jsme si výboj s určitými parametry, který jsme nejdříve zopakovali (tab. 1 – výchozí výboj). Parametry, které jsme používali při výchozích výbojích stejně, byly napětí na toroidálních cívkách 1400V, napětí v plazmatu 500V, napětí breakdown-u 100V (napětí plazmatu a breakdown-u zpožděný o 3ms) a předionizace byla zapnutá. Při všech pokusech byla komora vypečená (měla minimum nečistot).

Tab. 1 – Parametry výchozích výbojů (získání hodnot stabilizace)

výboj číslo	U _{st}	T _{st}	Δt	I _{p a (max)}	U _{loop}	T _e	T _{e max}
5800	0V	0ms	17ms	4,6 (6,6)kA	10,5V	82,8eV	161,3eV
5803	50V	10ms	15,62ms	4,4 (6,3)kA	10,2V	76,5eV	155,7eV
5808	100V	10ms	16,23ms	4,4 (6,4)kA	10,2V	77,4eV	150,5eV
5814	200V	10ms	16,84ms	4,8 (6,8)kA	9,9V	86,2eV	181,3eV
5816	300V	10ms	8,21ms	3,3 (6,2)kA	10,1V	54,9eV	122,2eV

výchozí výboj

nejlepší stabilizace

nejhorší stabilizace

U_{st} – napětí stabilizačních cívek, **T_{st}** – zpoždění stabilizačních cívek,
Δt – délka výboje, **I_{p a (max)}** – průměrný proud a (maximální),

U_{loop} – napětí na závitu, **T_e** – teplota, **T_{e max}** – maximální teplota

Následně jsme se pokusili tento výboj stabilizovat. Když jsme získali potřebné hodnoty

vhodné na stabilizaci (tab. 1), vytvořili jsme výboj bez stabilizace, s lepšími parametry (tab. 2, graf. 1), který jsme později stabilizovali pomocí hodnot získaných z předcházejícího pokusu.

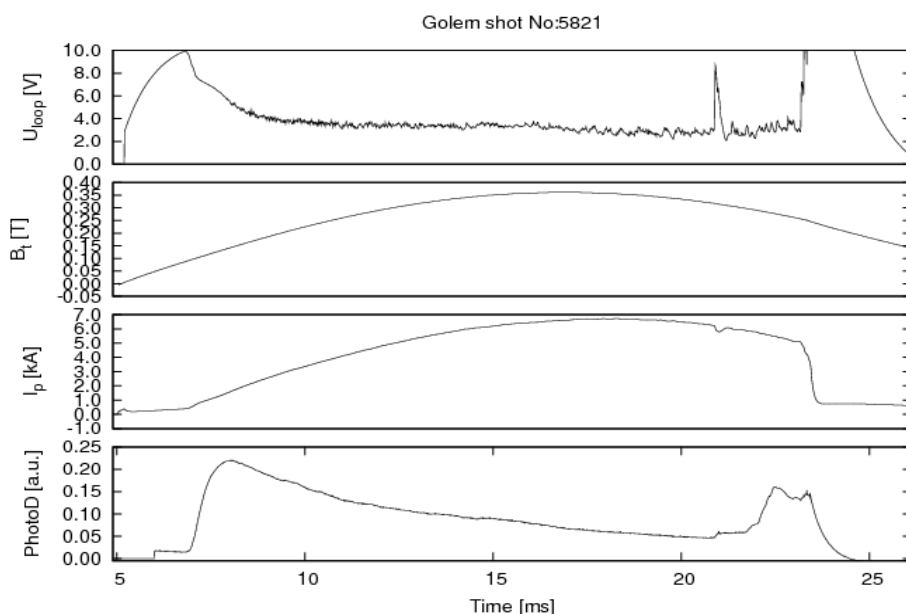
Tab. 2 – Parametry kontrolního výboje bez stabilizace

Číslo výstřelu	U_b	U_{cd}	T_{cd}	P_{H2}
5821	1400V	450V	0ms	20mPa

U_{loop}	$U_{loopmin}$	I_{pmax}	Te_{max}	Δt
10V	2,1V	6,7kA	170eV	17ms

U_b – napětí na toroidálních cívkách, U_{cd} – napětí v plazmatu, T_{cd} – zpoždění napětí v plazmatu,

P_{H2} – tlak vodíku, U_{loop} – napětí na závitě, $U_{loopmin}$ – minimální napětí na závitě, I_{max} – maximální proud plazmatem, Te_{max} – maximální teplota, Δt – délka výboje



Graf 1 – Hodnoty kontrolního výboje

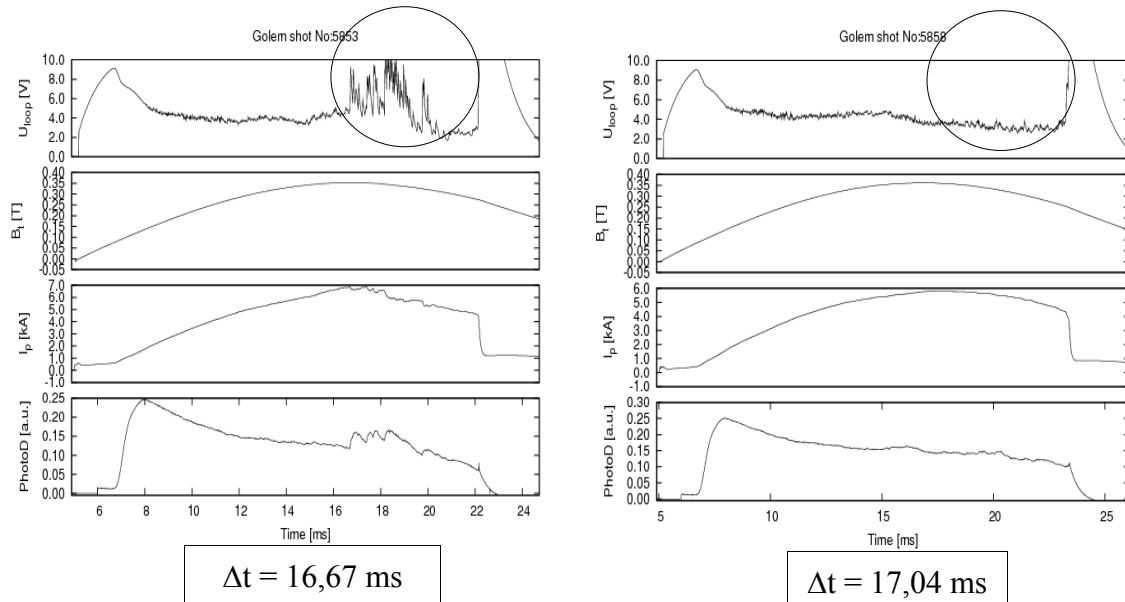
Hodnoty napětí na toroidálních cívkách (1400V), napětí na kondenzátorech primárního vinutí (450V), zpoždění sepnutí primárního vinutí oproti vinutí toroidálnímu (0ms) a tlak vodíku (20mPa), zůstávaly konstantní během všech ostatních měření. Taktéž jsme během testování kontrolního výboje používali předionizaci, měli vypnutý breakdown a komora byla vypečená.

3 Výsledky experimentu

Při vyhodnocování experimentu jsme se zaměřili na změny charakteru výboje v důsledku použití dynamické stabilizace, především s ohledem na délku výboje. Experimentálně se nám podařilo prodloužit délku výboje o 0,46 ms.

číslo výboje	U_{ds}	T_{ds}	P	T_a	T_{max}	I_{max}	I_a	Δt
5855	0 V	0 ms	19,45 mPa	88 eV	150 eV	5,8 kA	4,3 kA	16,58 ms
5858	250 V	10 ms	19,41 mPa	85,9 eV	142 eV	5,8 kA	4,4 kA	17,04 ms

Na tomto grafu vidíme porovnání kontrolního výboje ovlivněného dynamickou stabilizací $U_{ds}=250$ V a $T_{ds}=10$ ms (v obou případech). Na Grafu vlevo s polaritou ve špatném směru a na grafu v pravo s polaritou ve správném směru. Tím pádem jsme zjistili, že správná polarita dynamické stabilizace může zklidnit průběh a zvýšit délku výboje.



4 Závěr

V průběhu experimentů jsme zjistili opačnost polarity cívek dynamické stabilizace radiální polohy plazmatu na tokamaku GOLEM. Dále jsme překonali dva teplotní rekordy nejvyšší dosažené průměrné (nově 100,9 eV ve výboji č. 5821) a maximální dosažené (nyní 191,4 eV ve výboji č. 5847) teploty výboje. Výsledky měření potvrdily účinnost dynamické stability radiální polohy plazmatu.

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat našemu supervizorovi Ing. Ondřeji Kudláčkovi za jeho ochotu nám vždy poradit, RNDr. Janu Stöckelovi, CSc. za pomoc při nastavování optimálních parametrů a jeho odborné rady a Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za technickou spolupráci na tokamaku GOLEM.

Reference

- 1)Návod na ovládání tokamaku
Bc. Tomáš Markovič, Bc. Michal Odstrčil
Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská ČVUT v Praze
- 2)Řízená termojaderná syntéza, Ondřej Kudláček
- 3)Řízená termojaderná syntéza pro každého, Řípa, Weinzettl, Mlynář, Žáček