

Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

Dominik Beck¹, David Holub², Jan Vunderer³
Gymnázium Ivana Olbrachta, Semily¹
Gymnázium Slovanského náměstí, Brno²
Friedrich-Schiller-Gymnasium, Pirna³
DominikBeck@seznam.cz¹, kometak@gmail.com²,
Vunderer@seznam.cz³

Abstrakt:

V tomto projektu jsme se věnovali závislosti teploty na parametrech tokamaku GOLEM (tlak v komoře, napětí na kondenzátorech napájejících elektrické a magnetické pole a doba zpoždění elektrického výboje oproti magnetickému poli). Naším cílem bylo dosáhnout co největší teploty na tokamaku GOLEM, které jsme pomocí diagnostických metod měřili a zpracovávali.

1 Úvod

Termojaderná fúze – slučování lehkých jader – je v současné době objektem zkoumání mnoha vědců. Mohl by to totiž v budoucnu být zdroj energie. V současnosti nemáme bohužel technologii na tak vysoké úrovni, aby se nám plazma, ionizovaný plyn, podařil udržet v komoře k stabilnímu průběhu fúze. Fúzní reaktor se nazývá *tokamak*.

V našem malém projektu se zaměříme na určení co největší teploty. Naším cílem je nalézt možná co nejlepší poměr parametrů (tlak v komoře, napětí na kondenzátorech napájejících elektrické a magnetické pole a doba zpoždění elektrického výboje oproti magnetickému poli) tak, aby teplota byla co nejvyšší. Tím se blížíme k teplotě (řádově několik stovek elektronvoltů), při které dochází ke slučování jader.

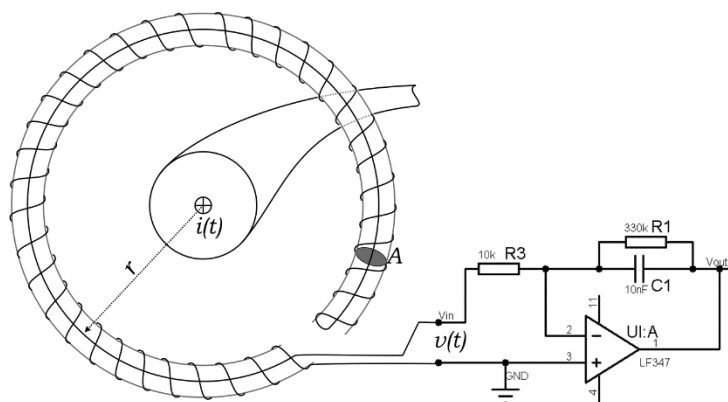
2 Optimalizační diagnostika tokamaku GOLEM

Materiály a metody

Ústředním bodem práce je funkční závislost teploty na parametrech, které jsme schopni určit měřením či pomocným výpočtem – odvození vzorce plyne z předpokladu parabolické teplotní distribuce, více pro odvození vizte^[1]:

$$T_e(0, t) = \left(0,7 \frac{I_p(t)}{U_I(t)}\right)^{2/3}$$

Měření napětí indukovaného na smyčce plazmatu je v celku snadné – číselně bude totiž z konstantnosti toku intenzity magnetického pole stejné jako v jakékoli jiné smyčce pomyslně obepínající siločáry mag. pole. Stačí pak změřit napětí na této smyčce. Dalším parametrem rovnice je proud v plazmatu. Zde nastává problém, jakým způsobem ho lze určit? Samotné měření z důvodu enormní hodnoty proudu je zcela nemožné, rovněž technické komplikace nám brání jeho měření; žádný materiál, ze kterého bychom chtěli ampérmetr vyrobit, není schopen vydržet teplotu plazmatu v tokamacích, aniž by se poškodil. Musíme tedy hledat alternativní detekci tohoto proudu - minimálně musíme kvantitativně určit veličinu, která bude jeho důsledkem. K tomu nám dopomůžou Maxwellovy rovnice. Dle zákona Ampérova bude proud v toroidálním plazmatu indukovat poloidální magnetické pole, jinými slovy, při zanedbání ztrát můžeme říci, že existuje přímá úměra mezi proudem a vzniklým poloidálním polem. Poloidální pole je však – kvůli přítomnosti mohutného toroidálního pole obtížně detekovatelné – je to jako hledat odraz světla z planet obíhajících okolo jiných hvězd. Tato technologická komplikace se lze však vyřešit velmi unikátním a elegantním způsobem:



Rogowského cívka (obr. výše) je cívka do tvaru anuloidu obklopující vodič s proudem. Design cívky umožňuje efektivně odstiňovat detekci magnetického pole rovnoběžného s vodičem. Dle Faradayova zákona elektromagnetické indukce bude změna poloidálního magnetického pole indukovat napětí na Rogowského cívce, kromě napětí indukovaného tímto magnetickým polem, by se ještě k tomu indukovalo napětí navíc ze silného toroidálního pole – jenomže Rogowského cívka je „oboustranná“ - co se týče smyčky kolmé na toroidální pole (vizte obrázek výše), celkový tok intenzity magnetické indukce bude tedy nulový a s ním i příspěvek napětí z toroidálního pole. Protože však cívky druhé zpětné smyčky nejsou anuloidovité cívky, nýbrž vodič kolmý na poloidální pole, bude indukované napětí rovno časové derivaci toku intenzity magnetického pole a toto napětí my Rogowského cívku změříme. Ekvivalentně můžeme tedy tvrdit, že napětí indukované na Rogowského cívce je úměrné integrálu toku intenzity magnetického pole, který je z geometrie problému evidentně úměrný intenzitě pole magnetického (roste s počtem závitů) a to je úměrné zjišťovanému proudu, a proto platí:

$$I_{\text{tot}}(t) = C \int_0^t U_B(t) dt$$

Kde C je specifická kalibrační konstanta pro náš problém (spočtena na $1.1 \cdot 10^7$)

Proud v plazmatu se ale nerovná celkovému proudu, který jsme změřili. Sama komora je vodivá a protéká v ní proud I_{ch} . Tím je proud I_{pl} protékající plazmatem roven rozdílu celkového změřeného proudu I_{tot} a proudu protékajícího komorou I_{ch} . Platí tedy:

$$I_{tot}(t) = I_{pl}(t) + I_{ch}(t)$$

Jak ale lze spočítat, popřípadě jinak vyjádřit proud tekoucí komorou, abychom mohli spočítat proud protékající plazmatem? Je to prosté: Protože je komora kovový vodič, podléhá Ohmovu zákonu, zároveň efektivní tok intenzity magnetického pole je jak na komoře, tak ve smyčce plazmatu stejný, tak i napětí v komoře i v plazmatu. Stačí tedy změřit napětí na komoře, odpor lze spočítat z dat získaných provedením vakuového shotu. Vzhledem k těmto

$$U_I(t) = R_{ch} \cdot I_{ch}(t)$$

Odsud nám už jen zbývá vyjádřit si z předchozích rovnic rovnici pro výpočet proudu protékajícího plazmatem, která zní:

$$I_{pl}(t) = I_{tot}(t) - \frac{U_I(t)}{R_{ch}}$$

Výsledky a zpracování dat

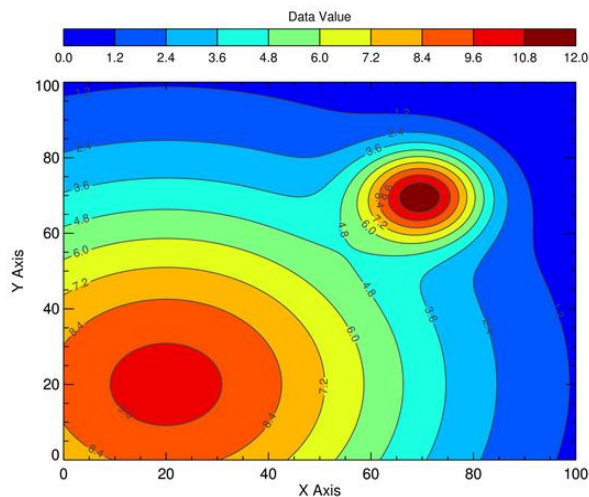
Data jsme získávali z výše teoreticky popsaných metod měření a snímali pomocí osciloskopu. Výsledky jsme zpracovávali v programu Gnuplot a vytvořili jsme graf závislosti indukce toroidálního magnetického pole na proudu v plazmatu. Hlavním cílem práce bylo nalezení takové alokace hodnot napětí U_B , U_{CD} , doby T_{us} a U žívali jsme variantu metody bisekce: zvolili jsme vhodný bod čtyřrozměrného prostoru s osami U_B , U_{CD} , T_{us} , p a pro něj spočetli z dat výboje maximální teplotu plazmatu, dále jsme volili nové vhodné body a postup opakovali. Postup výběru nových bodů probíhal následovně: Z původního jsme vždy vybrali pomocné dva, které byly od původního vzdáleny vždy námi zvolený nejpříměřenější rádius v dané ose, pro tyto body jsme spočetli teoretickou maximální teplotu a výsledky porovnali, bod s vyšším výsledkem se stal novým „vhodným bodem“, postup se opakoval v dalších osách, dokud nedošly – potom se postup znovu opakoval ve všech osách, ale nyní už s polovičními rádií, než

	p	T_{us}	U_B	U_{CD}	Tepl[eV]	AverT
Z0	16	10000	1000	700	55,3107	16,8
Zp1L	10				53,4601	16,3
Zp1P	30				55,4542	16,7
ZC1L		8000	800	500	56,8072	17,1
ZB1P			1000		55,7403	17
ZB1L			600		67,7696	21,9
ZT1P		11500			66,7631	20,4
ZT1L		4500			69,8376	23
ZC2P				600	68,6075	23,2
ZC2L				400	72,77	22,6
ZB2P			700		66,4576	19
ZB2L			500		73,833	23,9
ZT2L		2750			67,493	22
ZT2P		6250			72,841	23,1
Zp2L	35				72,9921	23,4
Zp2P	24				73,6167	23,7
ZT3L		5500			73,1741	23,8
ZT3P		7000			74,1057	23,4
ZB3L		450			70,8949	23,2
ZB3P		550			73,9978	23,4
ZC3L				350	68,22	19,4
ZC3P				450	70,451	22,9
Zp3P	28			400	70,896	20,8
Zp3L	22			400	72,6222	23,2

předchozími pro dané osy. Iteraci jsme zvolili tříkrokovou. V tabulce vpravo je tento postup znázorněn, každý řádek symbolizuje odchýlení od původního vhodného bodu daný rádius, čtyřznakový kód značí název projektu (Základy diagnostiky), kterou osu využíváme, číslo iterace a směr vychýlení k novým pomocným bodům (L=minus, P=plus). Šedobílé oblasti představují postup metody. Předposlední sloupec číselných hodnot představuje teoreticky vypočítané teplotní maximum plazmatu; poslední pak ukazuje průměrnou teplotu v tokamaku vypočtenou automatem na stránkách FJFI.

Diskuse

Problém chaosu – neměli jsme možnost zkusit všechny možnosti několikrát, determinovanost, vždycky nás provádí nejistota; eliminováni jsem ty alokace, ve kterých nám nevyšel žádný průřez. Funkce teploty nemusí mít jedno maximum – jako je např. na obrázku níže (obr. 1).



Pokud aplikujeme metodu bisekce na funkci teploty, jež má ve zkoumaném regionu více maxim, metoda konverguje k jednomu z lokálních maxim, nelze říci, že námi nalezené lokální maximum bude zároveň i maximem globálním.

Námi naměřené maximální teploty byly v průměru v porovnání s průměrnými teplotami s automatu 3,3x větší. Nad touto bizarností se zamýšlíme a podivujeme; poměr se nám zdá být nepřirozeně velký, a tak se domníváme, že kalibrační konstanta je špatně vypočtena (poměr je však zhruba konstantní).

3 Shrnutí

Nejvyšší teplota byla naměřena při výběru hodnot $p = 24\text{mPa}$, $T_{\text{us}}=7000\text{us}$, $U_b=500\text{V}$ a $U_{\text{CD}}=400\text{V}$. Jak jsme již ale zmínili, výsledky jsou pofidérní; oproti skutečnému optimu se mohou mírně lišit. To je způsobeno i deficitem času nebo simultánním využitím několika pracovních skupin.

Poděkování

Děkujeme FJFI za pořádání Týdne vědy, a tím umožnění tohoto projektu na tokamaku GOLEM. Taktéž děkujeme našemu supervizorovi Ing. Jaroslavu Krbcovi za pomoc a vstřícnost.

Reference:

- [1] <http://golem.fjfi.cvut.cz/>, 20. 5. 2014
- [2] KRBEČ J. *Vysokoteplotní plazma na tokamaku Golem 2014*