

Měření Hugillova diagramu Tokamaku Golem

R. Lavička*, V. Malý**, J. Šupík***

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1.

*romanl.007@post.cz, **etincz@gmail.com,

***jansupik@gmail.com

Abstrakt

V tomto projektu jsme se seznámili se základními funkcemi a diagnostikami Tokamaku Golem umístěného na naší fakultě. Naší snahou bylo sestavit Hugillův diagram tohoto tokamaku. Účelem diagramu je teoreticky předpovědět, jestli za daných vstupních parametrů může dojít k plazmovému výboji, či nikoliv. Také jsme se s velkým úspěchem pokusili jako první na naší fakultě (!) pořídit několik fotografií plazmového výboje.

1 Termojaderná fúze

Jadernou fúzí je označován děj, kdy dochází ke slučování lehkých jader atomů. Přitom se uvolní velké množství energie a vznikne prvek těžší. Taková reakce probíhá například ve Slunci. Aby k takové reakci došlo, jádra nejdříve musí překonat bariéru coulombovských sil, které zabraňují interakci. Výška bariéry pro 2 protony je zhruba 400keV [3]. K překonání bariéry lze využít kinetické energie tepelného pohybu jader. Pokud ale atomům dodáme takto vysokou tepelnou energii, existují už jen jako ionizované plazma.

Energeticky nejvýhodněji probíhá reakce izotopů vodíku deuteria a tritia. Při fúzi těchto dvou izotopů vznikne helium, neutron a uvolní se energie. Energetický výtěžek takové reakce je okolo 98 000 kWh/g. Navíc pro reakci deuteria a tritia je nutný ohřev jen 4keV [2].

2 Tokamak

Tokamak je zařízení používané pro výzkum v oblasti vysokoteplotního plazmatu a termojaderné fúze. Jeho úkolem je vytvořit a co nejdéle udržet plazma. Slovo Tokamak pochází z Ruska a znamená toroidální komoru v magnetických cívkách. Princip Tokamaku je jednoduchý. V pracovním plynu je pomocí transformátorového efektu, kde plyn představuje „sekundární závit cívky,“ indukován elektrický proud. Ten prochází plynem a ohmicky jej ohřívá na vysokou teplotu. (Magnetické pole indukující elektrický proud se nazývá toroidální.) Toho plazma je pak pomocí poloidálního magnetického pole udrženo v komoře a obíhá v ní ve směru siločar. Protože částice plazmatu mají elektrický náboj, vytvářejí svým oběhem vlastní magnetické pole, které způsobuje zatáčení částic do spirály.

Přestože první tokamaky byly vyrobeny již v 60. letech 20. století a zvládnutí termojaderné fúze se zdálo být otázkou několika desítek let, termonukleární elektrárny jsou stále nedostupné a v následujících několika desítkách let se to nezmění.

3 Tokamak Golem

Tokamak Golem byl zkonstruován v 60. letech v Ústavu atomové energie I. Kurčatova v Moskvě pod jménem TM-1-HM. Do ČSR byl přivezen v r. 1976 na základě Smlouvy o

spolupráci a dělbě práce v obl. vysokofrekvenčního ohřevu plazmatu. O rok později byl pod jménem Castor (Czech Academy of Science TORus) uveden do provozu v ÚFP AV ČR. Jeho úkolem bylo zkoumat vliv vysokofrekvenčních vln na plazma. Zde působil až ro roku 2006, kdy byl převezen na FJFI a přejmenován na Golem. Nyní slouží pod vedením Ing. Vojtěcha Svobody, Csc. k výuce studentů.

Tokamak Golem se svými rozměry řadí mezi malé tokamaky, jeho hlavní poloměr je 0,4m a šířka komory tvaru toru je 8,5 cm. Velikost toroidálního magnetického pole je 0,5-1,5 T a proud procházející plazmatem je 5-17 kA. Hustota plazmatu se pohybuje v hodnotách $(10-40) \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$. Teplota plazmatu se pohybuje mezi 100 a 300 eV. Doba trvání plazmového výboje je max. 50 ms. Tyto hodnoty se ale vztahují k tokamaku Castor za doby působení v ÚFP AV ČR, Golem takových výsledků zatím nedosahuje. Pro ilustraci hodnot aktuálních při našem měření je možno nahlédnout do tabulky 1 na straně 5.

Při vytváření plazmového výboje v Tokamaku Golem můžeme nastavit 4 hlavní parametry: velikost toroidálního a poloidálního pole (nastavujeme napětí na kondenzátorech, které se do tokamaku vybíjejí), tlak pracovního plynu v komoře (pracovali jsme s vodíkem) a časovou prodlevu mezi vytvořením toroidálního a koloidálního magnetického pole. Ovládání tokamaku je zajištěno přes počítač, kde se zadáním těchto parametrů vytvoří tzv. „makefile“, který slouží k uskutečnění výbojů.

Před použitím tokamaku je nutno vyčistit vakuovou komoru, aby dosahovala co nejlepší účinnosti. Toto čištění probíhá buď tak, že komoru zahřejeme na zhruba 70°C – 80°C, nebo použijeme doutnavý výboj. Ten může nastat v plynu za nízkého tlaku, zhruba 1Pa – 1000Pa, po zavedení elektrického proudu. Vnitřek tokamaku se vyplní vodíkem, elektroda je zasunuta dovnitř a je na ní přiloženo kladné napětí (~ +500V). Dojde k výboji mezi elektrodou a komorou. Vnitřní stěna je pak „bombardována“ kladnými ionty a molekuly absorbované na vnitřní stěně komory se uvolňují a odčerpávají se.

4 Diagnostika Tokamaku Golem

Během plazmového výboje v tokamaku měříme:

- Napětí komory
- Proud plazmatem
- Délku pulzu
- Náboj plazmatu
- Velikost toroidálního magnetického pole
- Výkon ohmického vytápění
- Centrální teplotu plazmatu
- Dobu udržení
- Bezpečnostní faktor
- Hustotu plazmatu

Tokamak Golem má 4 výstupy dat, které se v reálném čase vypisují do textového souboru (za jeden výstřel trvající 25 ms se vypíše asi 2000 hodnot), odkud jsou dále zpracovány a použity na grafické znázornění průběhu výboje a na výpočty dalších diagnostických veličin. Tyto 4 výstupy jsou:

- Svítivost okénka do tokamaku, kterou zaznamenává fotodioda, umístěná v okénku.
- Celkový proud (I_{tot}) tekoucí plazmatem a komorou, který měří rogowskiho cívka.
- Napětí komory (U_{loop}), spočtené z aktuálního napětí kondenzátorů.
- Indukce toroidálního magnetického pole, měřená jednoduchým drátěným závitem okolo komory.

Do grafické podoby se vypisují právě tyto 4 hodnoty v závislosti na čase.

Napětí komory (U_{loop})

Napětí komory je vlastně napětí sekundárního vití transformátoru. Napětí primárního vití (U_e) je napětí kondenzátorů, které se nastavuje jako jeden z parametrů před výbojem. Počet ovinutí cívky kolem jádra je 16.

$$U_{loop} = \frac{U_e}{16}$$

Po výstřelu je spočtena průměrná hodnota napětí komory a vypsána.

Proud plazmatem (I_{pl})

Proud tekoucí plazmatem je spočten z rovnice

$$U_{loop} = R_{ch}I_{tot} + L_{ch} \frac{dI_{tot}}{dt}$$

Abychom si mohli určit odpor komory (R_{ch}) a indukčnost komory (L_{ch}), musíme nejdříve provést několik tkz. vakuových výstřelů. Při těchto výstřelech nedochází k napuštění komory vodíkem, tedy nevzniká ani plazma. Potom je celkový proud ekvivalentní s proudem komory. Z těchto měření dopočteme odpor a indukčnost komory. Pro tokamak Golem byly naměřeny tyto hodnoty:

$$R_{ch} = 9,81 m\Omega$$

$$L_{ch} = 7,5 \cdot 10^{-4} mH$$

Proud komory tedy spočítáme z:

$$U_{loop} = R_{ch}I_{ch} + L_{ch} \frac{dI_{ch}}{dt}$$

a výsledný proud plazmatem dopočteme z:

$$I_{tot} = I_{ch} + I_{pl}$$

Délka pulzu:

Jedná se o celkovou dobu, kdy bylo v komoře plazma. Počítá se z proudu plazmatu. Ve chvíli, kdy proud plazmatem dosáhne velikosti 500 A, program začne měřit čas, dokud proud opět neklesne pod 500 A. Naměřený čas se vypíše jako životnost plazmatu. Při našich měření byla délka pulzu kolem 4 ms.

Náboj plazmatu:

Spočte se ze známé definice elektrického proudu, tedy integrací proudu plazmatem podle času.

$$Q = \int I_{pl} dt$$

Výkon ohmického vytápění

Spočteno ze vzorce:

$$P_{oh} = U_{loop}I_{pl}$$

Centrální teplota plazmatu

Je odvozena ze složitých vzorců [1] a k výpočtu je používán vzorec:

$$T_e = 89,8 \left(\frac{I_{pl}}{U_{loop}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Doba udržení (τ_e)

Částice (energie) v plazmatu mají tendenci utíkat z plazmatu pryč. Energie uniká vedením tepla, tepelným prouděním i tepelným zářením. Doba udržení je průměrná doba, kterou částice v plazmatu stráví. Vypočítá se jako podíl práce plazmatu (W_{pl}) a výkonu ohmického vytápění (P_{oh}). Výpočet velikosti práce plazmatu je opět odvozen [1].

$$\tau_e = \frac{W_{pl}}{P_{oh}} \quad W_{pl} = \frac{f n k_b T_e}{6}$$

Hustota plazmatu (ρ)

Znalost hustoty plazmatu je důležitá k určení Hugillova diagramu. Bohužel, u tokamaku Golem nejsou přístroje, které by dokázaly změřit hustotu horkého plazmatu. Z tohoto důvodu si musíme vystačit pouze s velmi přibližným odvozením ze stavové rovnice, kdy budeme plazma považovat za plyn. Toto je asi největší problém našeho měření.

$$\begin{aligned}pV &= nRT \\ p \frac{N}{\rho} &= nRT \\ p \frac{N}{nRT} &= \rho \\ p \frac{N}{k_B T} &= \rho\end{aligned}$$

k_B je Boltzmanova konstanta

Bezpečnostní faktor (q_{edge})

Bezpečnostní faktor je číslo, které udává počet oběhů magnetické siločáry v toroidním směru, na jedno otočení magnetických čar ve směru poloidálních. Čím je menší, tím větší pravděpodobnost disrupce.

$$q_{edge} = \frac{a^2 2\pi B_t}{R \mu_0 I_{pl}}$$

a je hlavní poloměr tokamaku. Pro tokamak Golem se počítá

$$q_{edge} = 90,3 \frac{B_t}{I_{pl}}$$

Obecně se za hraniční bezpečnostní faktor považuje $q < 3$. Podle toho se také navrhuje tokamaky

5 Hugillův diagram

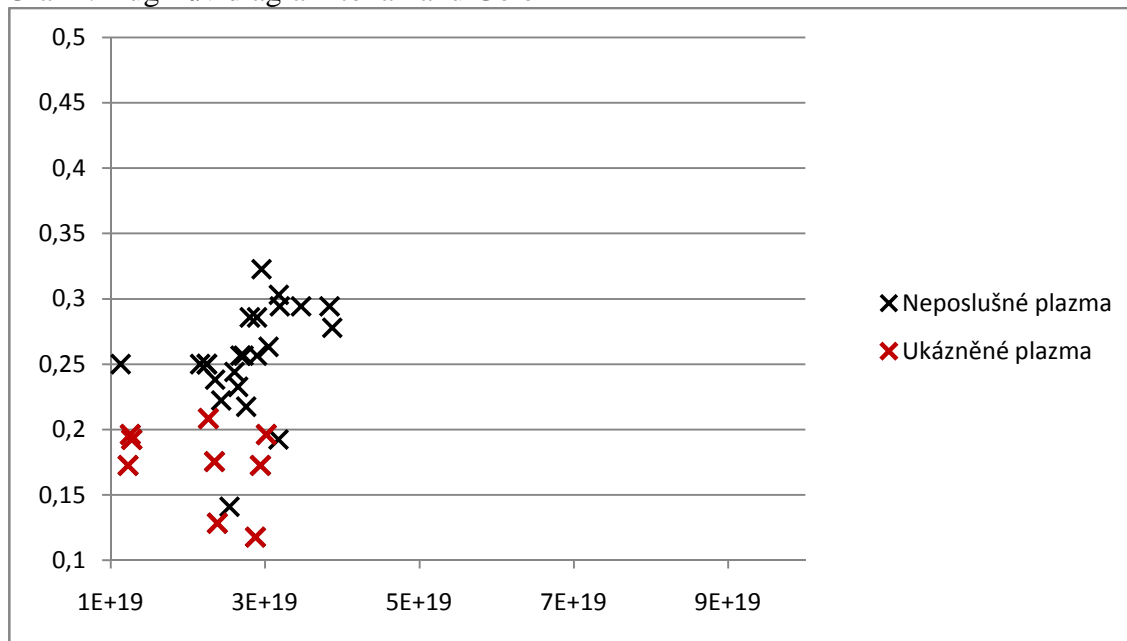
Nyní jsme se dostali k centru našeho zájmu. Aby se operátorům na tokamaku mohli snadněji určovat hodnoty, při kterých má ještě smysl provádět výstřel, pomáhají si Hugillovým diagramem. To je diagram závislosti normalizovaného proudu ($\frac{1}{q_{edge}}$) na normalizované hustotě ($\frac{\rho R}{B_t}$). Jeho okrajová část znázorňuje hranici, kdy ještě bude v tokamaku vznikat plazma a kdy už bude docházet k příliš velkým disrupcím. Obecně lze říci, že normalizovaný proud se zvyšuje se zvětšováním elektrického pole a normalizovaná hustota se zmenšuje se zvyšováním magnetického pole, což vyplývá z výše uvedeného.

6 Naměřený diagram

Do našeho měření jsme použili 32 úspěšných výstřelů. Naše výsledky je možno vidět v tabulce 1. Údaje z použitých výstřelů jsou k nalezení [2], (tj. Shot2418, shot2419, shot2422-2425). Makefile s nastavením výstřelů pro jednotlivé výstřely je v příloze 1. U_e a U_b zde značí napětí na kondenzátorech, T_d časovou prodlevu mezi spuštěním toroidálního a poloidálního magnetického pole, H_2 filling přítomnost pracovního plynu a p_{H_2} tlak vodíku v komoře před výstřelem. Z naměřených hodnot normalizovaného proudu a hustoty jsme sestavili výsledný diagram (viz graf 1). Červeně označené body jsou hodnoty, kdy se plazma v průběhu výstřelu chovalo relativně klidně. Na tomto základě jsme usoudili, že pro tokamak Golem je nejlepší nastavit tlak plynu co nejvíce, magnetické pole mít nabito co nejvíce a elektrické pole nabít na 500 V. Časové zpoždění el. Pole za mag. Polem nemá na kvalitu

plazmatu zásadní vliv.

Graf 1: Hugillův diagram tokamaku Golem



Tabulka 1: Naměřené parametry plazmových výbojů

Q_{edge} [m.T/A]	Hustota elektronů [1/m ²]	B_t [T]	Norm. proud [A]	Norm. hustota [kg/m ³]
7,1	2,00E+19	0,315	0,14085	2,54E+19
3,4	1,30E+19	0,15	0,29412	3,47E+19
3,4	1,40E+19	0,146	0,29412	3,84E+19
3,3	1,20E+19	0,151	0,30303	3,18E+19
3,9	1,10E+19	0,152	0,25641	2,89E+19
3,5	1,10E+19	0,152	0,28571	2,89E+19
3,9	1,00E+19	0,147	0,25641	2,72E+19
3,9	1,10E+19	0,164	0,25641	2,68E+19
3,5	1,10E+19	0,157	0,28571	2,80E+19
3,6	1,50E+19	0,155	0,27778	3,87E+19
4,5	9,60E+18	0,158	0,22222	2,43E+19
4	1,00E+19	0,178	0,25	2,25E+19
4,1	1,10E+19	0,169	0,2439	2,60E+19
3,4	1,30E+19	0,163	0,29412	3,19E+19
4,2	1,10E+19	0,187	0,2381	2,35E+19
4	9,60E+18	0,178	0,25	2,16E+19
3,1	1,30E+19	0,176	0,32258	2,95E+19
5,8	9,40E+18	0,307	0,17241	1,22E+19
7,8	1,90E+19	0,319	0,12821	2,38E+19
8,5	2,30E+19	0,32	0,11765	2,88E+19

Q_{edge} [m.T/A]	Hustota elektronů [1/m ²]	B_t [T]	Norm. proud [A]	Norm. hustota [kg/m ³]
5,2	9,80E+18	0,308	0,19231	1,27E+19
5,7	1,80E+19	0,307	0,17544	2,35E+19
5,8	2,30E+19	0,313	0,17241	2,94E+19
5,1	9,40E+18	0,3	0,19608	1,25E+19
4,8	1,70E+19	0,3	0,20833	2,27E+19
5,1	2,30E+19	0,305	0,19608	3,02E+19
4	8,30E+18	0,294	0,25	1,13E+19
4	1,70E+19	0,303	0,25	2,24E+19
3,8	2,30E+19	0,302	0,26316	3,05E+19
5,2	2,30E+19	0,29	0,19231	3,17E+19
4,6	2,30E+19	0,334	0,21739	2,75E+19
4,3	2,30E+19	0,347	0,23256	2,65E+19

7 Pořizování fotografií výboje

Všechny fotografie byly pořízeny průhledem do tokamaku Golem se stejným nastavením – f/13, 15s, ISO-400, 55mm. Zachycují světelný výboj při vytvoření plazmatu uvnitř komory. Čím silnější výboj, tím bylo vyzářené světlo intenzivnější. Pro ilustraci přikládáme několik fotografií (přílohy 2 a 3).

8 Závěr

Při našem měření jsme vytvořili Hugillův diagram tokamaku Golem (viz graf 1). Také jsme pořídili několik fotografií plazmových výstřelů a pokusili jsme se je analyzovat. Došli jsme k závěru, že čím byl výboj v tokamaku silnější, tím intenzivnější bylo světlo vycházející ven.

9 Přílohy

Příloha 1: Makefile s nastavením parametrů našich výstřelů

Grandloop:

```
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=400 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=400 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=400 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=425 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=425 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=425 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=450 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=450 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=450 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=475 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
```

make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=475 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=475 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=500 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=500 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=500 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;

make -iBs -C velin shot Ue=500 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=500 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=72 #approx 70 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=500 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=72 #approx 70 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=600 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=72 #approx 70 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=700 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=70 #approx 50 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=72 #approx 70 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;

make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=800 Td=2000 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=800 Td=4500 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;
make -iBs -C velin shot Ue=800 Ub=800 Td=6000 H2filling=1 pH2=100 #approx 100 mPa;

Příloha 2: Fotografie plazmatu č. 1 o náboji Q=15,8C



Příloha 3: Fotografie plazmatu č. 2 o náboji $Q=5,3C$



10 Poděkování

Velmi bychom chtěli poděkovat našemu učiteli, Ing. Vojtěchu Svobodovi, Csc., za možnost měřit na tomto unikátním zařízení a také za odbornou pomoc při našem projektu.

11 Reference

- [1] V. Svoboda, Tokamak Golem, <http://golem.fjfi.cvut.cz>
- [2] V. Weinzettl, Termojaderná fúze, http://server.ipp.cas.cz/~vwei/fusion/fusion_c.htm
- [3] ITER, www.iter.org
- [4] J. Brotánková, *Studium horkého plazmatu v experimentálních zařízeních typu tokamak*, str. 35-37, disertační práce, Karlova univerzita, Praha, 2009
- [5] V. Svoboda, Archiv výstřelů tokamaku Golem, <http://golem.fjfi.cvut.cz/operation/shots/>