



Fyzikální praktikum

ČVUT - Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská



Úloha #13A: Vysokoteplotní plasma na tokamaku GOLEM

Datum měření: 3. března 2014

Skupina: 3 (Pondělí - Dopoledne)

Autor: Filip Nechanský, druhý kruh

Měřeno s: Kateřina Brouzdová, Alena Harlenderová, Borek Najman

Klasifikace:

1 Pracovní úkoly

1. V domácí přípravě se naučte manipulaci se vzdálenými datovými soubory. Pokud máte možnost, přineste si s sebou na měření notebook, na kterém máte tyto funkce manipulace se vzdálenými soubory zprovozněné. Na stejné stránce najdete přidělené web rozhraní, ze kterého budete ovládat tokamak. Seznamte se s ním.
2. V laboratoři tokamaku se seznamte fyzicky s tokamakem GOLEM a zmapujte na něm jeho základní prvky: komoru, transformátorové jádro, cívky torodiálního magnetického pole, primární cívky, čerpací systém, energetický zdroj, kondenzátorové baterie, systém napouštění pracovního plynu, řídicí systémy, datový sběr a server. Provéřte funkci jednotlivých komponent infrastruktury tokamaku:
 - (a) vypněte a zapněte čerpání tokamaku,
 - (b) napusíte do tokamaku pracovní plyn,
 - (c) vyzkoušejte předionizační trysku.
3. V laboratoři tokamaku osadíte tokamak základními diagnostickými prostředky (drát na měření napětí na závit, cívečka měření torodiálního magnetického pole, Rogowského pásek pro měření I_p a fotodiodu na měření záření), napojte vše na 4-kanálový osciloskop Tektronix a zaznamenávejte časové vývoje signálů jednotlivých diagnostik. Proveďte následující seznamovací experimenty (pro přístup k datům na vzdáleném serveru použijte metodu z pracovního úkolu č.1):
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné torodiální elektrické pole E_t a zaznamenejte časový průběh napětí na závit $U_l(t)$. Z jeho průběhu a signálu z Rogowského pásku $I_t(t)$ odhadněte z ohmova zákona v prvním přiblížení odpor komory R_{ch} se zanedbáním její indukčnosti.
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné torodiální magnetické pole B_t a zaznamenejte časový průběh napětí na měřicí cívce $U_B(t)$.
 - Vytvořte komplexní zadání pro výboj (pracovní plyn + předionizace + torodiální elektrické pole + torodiální magnetické pole) v tokamaku a zadejte k provedení. Z napětí na závit $U_l(t)$ a průběhu proudu na Rogowského pásku $I_t(t)$ vypočítejte časový vývoj proudu plazmatem $I_p(t)$ se zanedbáním indukčnosti. Následně znázorněte časový vývoj elektronové teploty $T_e(t)$.
4. Všechny závislosti získané z improvizované diagnostiky srovnávejte s původním diagnostickým osazením tokamaku GOLEM.
5. Vzdáleným řízením z praktik proveďte (třeba ve spolupráci s dalšími skupinami) určitý počet výbojů, ve kterém se budete snažit pokrýt maximálně prostor parametrů (zadávejte co nejpestřejší spektrum výbojů), přičemž se pokuste dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty.

6. Doma, při postzpracovávání výsledků:

- Z vybraného vakuového výboje spočítejte (s příslušnou chybou) odpor a indukčnost komory. Doporučujeme provést fit v gnuplotu.
- Vytvořte tabulku 10 výstřelů s nejvyšší T_e . U každého uveďte délku výboje, maximální proud plazmatem (se započtením indukčnosti komory a sloupce plazmatu), maximální elektronovou teplotu, maximální ohmický příkon, maximální energii plazmatu a maximální dobu udržení.

Poznámka: Původní zadání úlohy bylo jiné (viz [2]), avšak během měření nám bylo řečeno, že se máme řídit novým zadáním [1], jehož úkoly jsou vypsány výše.

2 Pomůcky

Tokamak GOLEM, diagnostika - fotodiody, Rogowského pásek, U_l , B_t cívky, osciloskop Tektronix, pracovní plyn, počítač.

3 Teoretický úvod

Teorie vychází z [1], pokud nebude řečeno jinak.

3.1 Tokamaky obecně

Tokamak je zařízení pro udržení vysokoteplotní plazmy, pokud možno takové, aby v ní mohlo docházet k fúzi. Má torodiální tvar a uvnitř je stabilní torodiální magnetické pole, které drží žhavou plasmu dále od stěn. Dalším prvkem je torodiální elektrické pole, které urychluje pohyb nabitých částic.

Při správných podmínkách stačí v tokamaku několik volných elektronů, které urychlené elektrickým polem, naráží do dalších atomů (např. H_2), které uvolní další elektrony, čímž vzniká řetězová reakce. Po krátké době se neutrální plyn takto změní na plasmu.

Procesy v tokamaku jsou samozřejmě mnohem složitější, a vzniká zde velké množství jevů, které sťažují udržení plazmy. Proto se například v tokamaku GOLEM daří udržet plasmu jen desítky milisekund. Podrobnější popis fungování tokamaku lze nalézt v zadání [1].

3.2 Elektronová teplota a hustota

Jeden z parametrů, které máme měřit, je elektronová hustota. Ta se řídí Spitzerovou formulí, která říká $T \propto R^{3/2}$. V našem případě však použijeme tento vztah:

$$T_e(0,t) = \left(0,7 \frac{I_p(t)}{U_l(t)}\right)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

kde U_l je napětí na závit a I_p je proud plazmy. Zde je důležité, že teplota takto vyjde v eV. Převodní vztah mezi elektronvolty a kelviny je $1 \text{ eV} \approx 11600 \text{ K}$.

3.3 Ohmický výkon a energie plazmatu

Ohmický výkon je výkon ohmického ohřevu v plazmatu. Jde o teplo uvolněné prouděním plazmy, jelikož plasma nemá nulový odpor. Vztah pro tento výkon je

$$P_{OH} = U_l I_p - \frac{d}{dt} L_p I_p^2 \approx U_l I_p, \quad (2)$$

kde druhá rovnost platí pro náš případ, kdy uvažujeme $L_p \sim 0$. Energie plazmatu vychází z ekvipartičního teoremu:

$$W_{th} = 3/2 \int (n_i T_i + n_e T_e) dV \approx 3 \int n_e T_e dV = \frac{\bar{n} k_B T_p V}{3} = \frac{2 p_0 T_p V}{3 T_{ch}} \quad (3)$$

kde \bar{n} je elektronová hustota, pro kterou platí vztah

$$\bar{n} = \frac{2 p_0}{k_B T_{ch}}, \quad (4)$$

kde T_{ch} je pokojová teplota. Poslední potřebným pojmem je doba udržení plazmatu, která je definována jako

$$\tau_E(t) = \frac{W_{th}(t)}{P_{OH}(t) - \frac{d}{dt} W_{th}(t)} \quad (5)$$

3.4 Výpočet proudu plazmatu

V tokamaku vznikají dva proudy, proud v plasmě I_p a proud v komoře I_c . My budeme měřit celkový proud I_t , naším cílem je pak ze znalosti odporu komory a napětí určit proud plazmatu:

$$I_p = I_t - U_l / R_c, \quad (6)$$

kde opět berem indukčnosti L_p, L_c jako nulové. Odpor komory dostaneme z

$$U_l = I_c R_c + d/dt L_c I_c \quad (7)$$

fitem. Z toho dostaneme $i L_c$. Podle jeho hodnoty můžeme poté posoudit, zda jeho aproximace na nulu byla oprávněná.

4 Postup měření

4.1 Seznámení s tokamakem

Nejdříve jsme prošli uvodní přednáškou a seznámili se se všemi důležitými částmi tokamaku. Tedy například komorou, cívkou, čerpací systém, energetický zdroj, řídicí systémy a podobně. Kromě místnosti s tokamakem je jeho nedílnou součástí i místnost s kondenzátory, které tvoří vysoké napětí potřebné pro jeho provoz.

4.2 Zapojování diagnostických prostředků

S pomocí asistenta jsme na GOLEM zapojili diagnostické prvky. Rogowského páskem jsme obemkli komoru, fotiodu jsme zapojili na jeden z průhledů. Drát na měření napětí na závit jsme rozložili po vrcholu komory. Do určeného místa jsme vložili cívečku pro měření torodiálního magnetického pole. Vše jsme pak zapojili do oscilátoru Tektronix a nastavili časovou osu na potřebný rozsah. Poté jsme nastavili spouštění osciloskopu napětím.

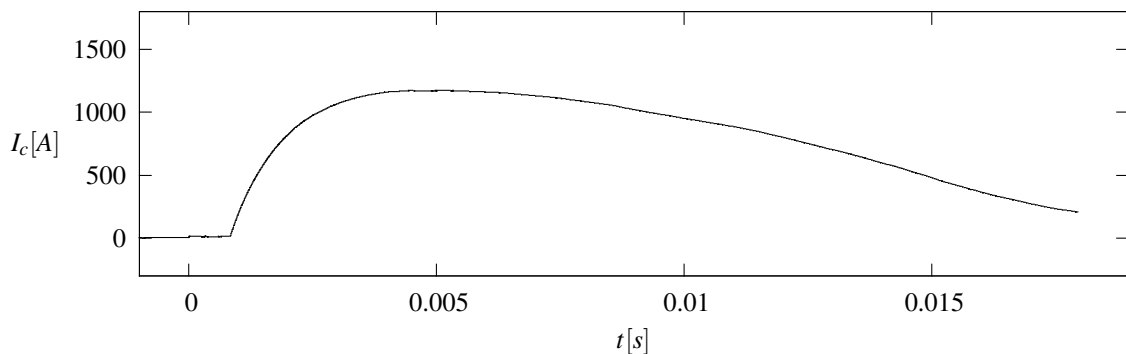
4.3 Seznamovací experimenty

Pomocí web rozhraní jsme nastavili několik výbojů. Nejdříve jsme pracovali bez pracovního plynu a udělali jsme výboj naprázdno, pak jsme vygenerovali samostatné elektrické pole a magnetické pole.

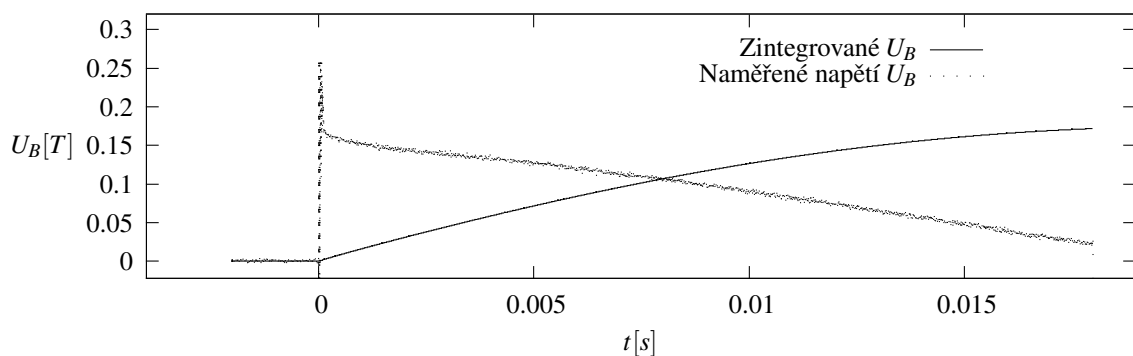
Nakonec jsme použili pracovní plyn a udělali komplexní výboj, tedy i s předionizací a všemi poli.

4.4 Vzdálené řízení

Vzdáleným řízením jsme zadali větší množství výbojů (kolem 20) přes web rozhraní. Snažili jsme se pokrýt co největší množství parametrů. Bohužel nebyl čas počkat, jak tyto výboje dopadnou a odhadnout, které nastavení vede k větším teplotám.



Obrázek 1: Průběh proudu I_c v komoře bez pracovního plynu pro shot 14340.



Obrázek 2: Naměřené napětí U_B a jeho integrace $\int U_B \propto B$ pro shot 14341

5 Vypracování

5.1 Výboj naprázdno a magnetické pole

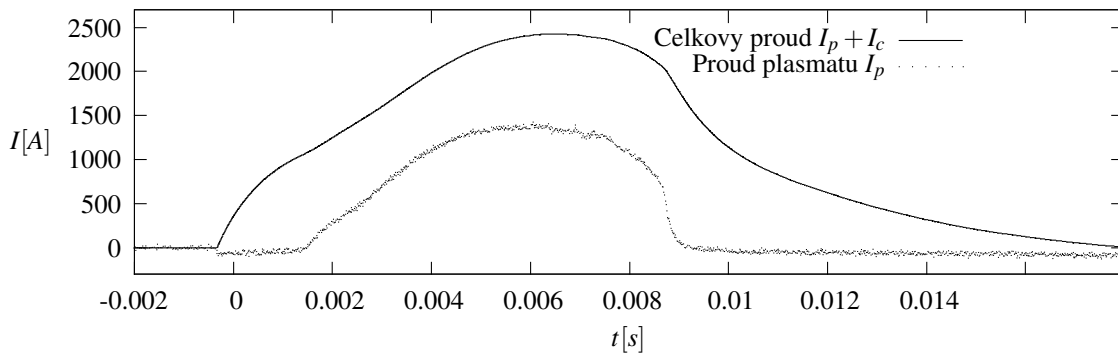
Na grafu na obrázku 1 je vidět průběh proudu pro shot 14340. Ze znalosti proudu a jeho derivace jsem pak jako funkci více proměnných našel rovnici 7. Výsledné hodnoty pro odpor a indukčnost byly $R_c = (10,493 \pm 0,004) \text{ m}\Omega$, $L_c = (563 \pm 12) \text{ nH}$.

Také jsme měli zaznamenat samostatné magnetické pole, resp. napětí které produkuje v diagnostice. Jelikož napětí zobrazuje derivaci magnetického pole (to vychází z Maxvelových rovnic), tak je potřeba tyto data zintegrovat. Protože to však v zadání explicitně uvedeno, tak raději uvádím obě křivky na obrázku 2, jedná se o shot 14341. Napětí nezintegrovaného je totožné s daty, které přišli na osciloskop, zintegrovanou křivku jsem vynásobil, aby byly obě křivky na stejném grafu dobře viditelné. Ale jelikož neznáme převodní konstantu, tak je toto měření pouze kvalitativní.

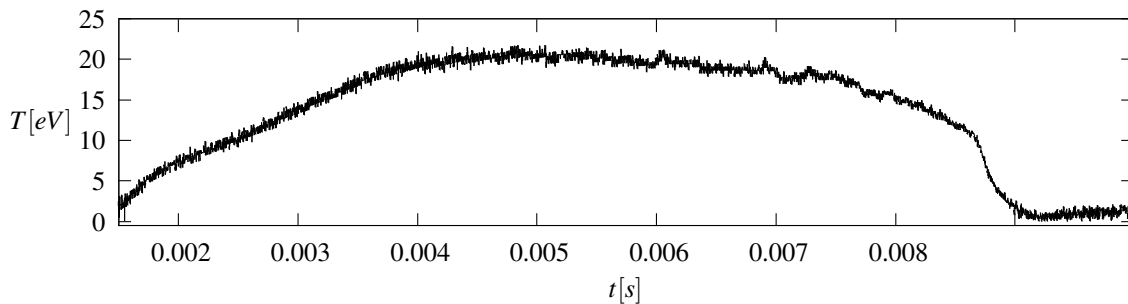
5.2 Komplexní výboj

Jako komplexní výboj jsem vybral shot 14354 (jelikož při původním komplexním shotu nefungoval správně osciloskop). Parametry byly: tlak 23.82 mPa, magnetické pole 900 V, elektrické pole 650 V, spoždění proudu bylo 4 ms. Graf na obrázku 3 zobrazuje proud v plasmatu a i celkový proud. S pomocí vztahu 1 jsem pak vyjádřil elektronovou teplotu, jejíž průběh je vidět na obrázku 4.

I když to nebylo v zadání, tak jsem do přílohy umístil graf ohmického příkonu a práce (obrázky 5 a 6).



Obrázek 3: Naměřený celkový proud $I_t = I_p + I_c$, proud plazmatu I_p pro shot 14354



Obrázek 4: Vypočtená teplota ze vztahu 1 pro shot 14354

5.3 Výboje pro různé parametry

Celkově jsem zpracoval asi 16 výbojů (nastavili jsme jich víc, ale ne vždy došlo k průrazu a z počátku nefungovala správně diagnostika), deset s největší elektronovou teplotou je uvedeno v tabulce 1. Výsledky a možné parametry ovlivňující elektronovou teplotu rozeberu v diskuzi.

#shot	Δt [ms]	I_p [A]	T_e [eV]	P_{OH} [kW]	W_{th} [mJ]	τ_E [ms]	U_B [V]	U_{CD} [mJ]	T_{CD} [ms]	p_0 [mPa]
14346	7,0	2028	31,07	20,6	0,429	47,8	200	600	20,0	10,16
14360	9,2	2299	30,68	27,2	0,279	22,9	950	700	4,0	6,61
14338	8,1	1723	28,38	17,6	0,614	6,08	900	600	2,0	15,67
14336	7,5	1637	27,89	16,3	0,610	63,2	800	600	0,5	16,10
14353	4,6	1644	27,72	15,7	0,192	25,1	200	600	4,0	5,29
14337	7,7	1755	27,50	17,5	0,612	63,3	800	600	1,0	15,67
14350	4,5	1492	27,04	13,4	0,315	36,8	200	600	4,0	8,35
14345	7,4	1444	24,40	14,7	0,654	69,8	800	600	2,0	19,58
14344	9,1	1474	23,49	14,5	0,339	42,1	900	600	20,0	10,43
14356	7,2	1303	21,53	13,0	0,646	71,5	800	600	2,0	21,72

Tabulka 1: Deset výbojů s největší elektronovou teplotou T_e , pro každé měření je uvedeno číslo výboje #shot, doba výboje Δt , proud plasmy I_p , ohmický výkon P_{OH} , energie plasmatu W_{th} , doba udržení τ_E , nastavené napětí pro magnetické a elektrické pole U_B, U_{CD} , spoždění elektrického pole T_{CD} a počáteční tlak p_0 .

6 Diskuze

6.1 Porovnání hodnot z obou diagnostik

Ve výsledcích z naší diagnostiky a diagnostiky tokamaku byly občas výrazné rozdíly. Proudy vycházely celkem podobně, avšak teplota už ne. U shotu 14354 byla maximální elektronová teplota kolem 20, v oficiální analýze bylo asi 16. Tak to bylo u všech měření, která jsem kontroloval. Jelikož tvar křivky vypadá stejně, tak někde je potřeba udělat dodatečný převod. Ohmická tepla vycházela podobně.

6.2 Parametry komory

Fitování proudu a jeho derivace jsem úspěšně určil odpor a indukčnost komory jako $R_c = (10,493 \pm 0,004)$ m Ω , $L_c = (563 \pm 12)$ nH. Indukčnost je velmi malá, což opodstatňuje naše rozhodnutí i uvažovat nulovou.

6.3 Komplexní výboj

Na obrázku 3 je vidět jak celkový proud, tak proud plasmatu. Je dobře vidět, jak je proud plasmatu nulový, pak dojde k zřetelnému výboji, který se po krátké době utlumí a opět zbývá jen proud komory.

Teplota komory dosáhla asi 20 eV, což odpovídá cca 232000 K. To je dosti vysoká teplota (asi 40x teplejší než povrch slunce), vzhledem ke stáří tokamaku mne překvapilo, jakých teplot je schopný dosahovat. Průběh elektronové teploty je na obrázku 4.

6.4 Výboj pro různé parametry

Cílem této části měření bylo zkusit dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty. Bohužel nám nezbývalo moc času a většina námi nastavených výbojů proběhla až po skončení praktika, takže jsme neměli možnost vytvořit hypotézu o citlivosti elektronové teploty na různé parametry už na místě.

V tabulce 1 jsou shoty s největší elektronovou teplotou. Bohužel není vidět žádná očividná závislost elektronové teploty na počátečních parametrech. Ideální by bylo samozřejmě mít třeba deset měření při kterých by se měnil pouze jeden parametr (a to provést pro každý parametr), ale to je něco, na co v rámci praktika není čas.

Napětí pro magnetické pole se zdá, že teplotu neovlivňuje, i když může jít pouze o špatnou korelaci s ostatními parametry. Zdá se, že menší počáteční tlak vede k vyšším teplotám, i když ani tady korelace není výrazná. Spozdění elektrického pole také nevypadá, že by výrazně ovlivňovalo teplotu.

Mým závěrem tedy je, že přesné určení závislosti elektronové teploty vyžaduje mnohem rozsáhlejší a systematictější měření. Možností by teoreticky bylo umožnit studentům provést přímo na místě pouze pár měření a poté jim umožnit udělat velké množství měření až třeba doma. Ale je mi jasné, že tokamak neslouží pouze pro účely praktik, a tedy je tato možnost dost nerealizovatelná.

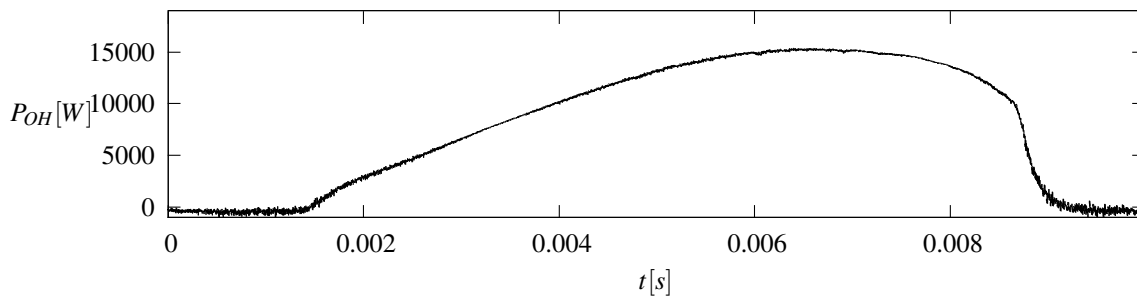
7 Závěr

Nepovedlo se nám bohužel moc dobře prozkoumat závislost elektronové teploty na různých parametrech. Zbytek měření proběhl dobře, určil jsem vlastnosti komory $R_c = (10,493 \pm 0,004) \text{ m}\Omega$, $L_c = (563 \pm 12) \text{ nH}$ a zobrazil graficky různé závislosti. Celkově jsem si dobře osvojil základní ovládání tokamaku a práci s daty, stejně tak jsem mírně pronikl do teorie kolem chování těchto zařízení.

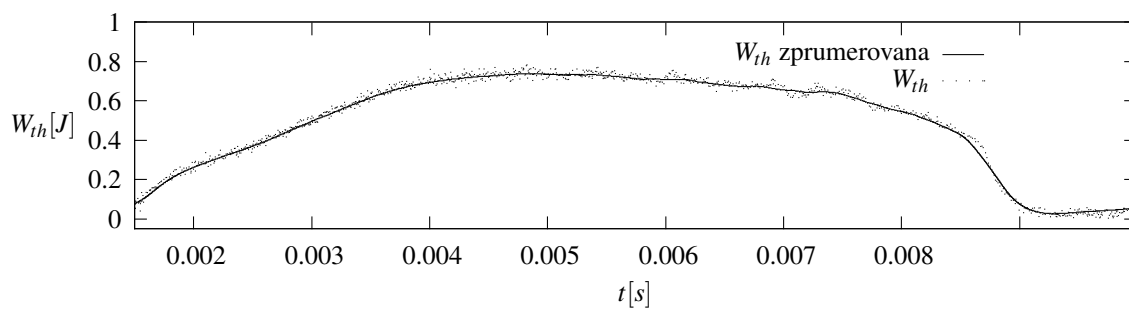
Reference

- [1] "Vysokoteplotní plasma na tokamaku golem, verze 1. března", [3. března 2014], dostupné na:
< <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/TrainingCourses/KFpract/14/Basics/uloha13A.pdf> >
Skupina tokamaku GOLEM
- [2] "Vysokoteplotní plasma na tokamaku golem, verze 3", [27. února 2014], dostupné na:
< http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/2757/mod_resource/content/4/uloha13A_v3.pdf >
Skupina tokamaku GOLEM

8 Příloha



Obrázek 5: Průběh ohmického výkonu P_{OH} v závislosti na čase pro shot 14354



Obrázek 6: Průběh energie plazmatu W_{th} a její zprůměrování přes 200 hodnot pro shot 14354