

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM 2

FJFI ČVUT V PRAZE

Úloha 13(A). Vysokoteplotní plazma v tokamaku GOLEM

Vypracoval	Miroslav Šos	Kruh	7.	Datum měření	31.3.2014
Spolupracovala	Kateřina Chytrá	Skupina	Pondělí 13:30	Klasifikace	

1 Pracovní úkoly

1. V domácí přípravě se naučte manipulaci se vzdálenými datovými soubory, viz [2]. Pokud máte možnosti, přineste si s sebou na měření notebook, na kterém máte tyto funkce manipulace se vzdálenými soubory dat 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 toroidálního 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) napusťte do tokamaku pracovní plyn,
 - (c) vyzkoušejte předionizační trysku.
3. V laboratoři tokamaku osadte tokamak základními diagnostickými prostředky (drát na měření napětí na závit, cívečka měření toroidálního magnetického pole, Rogovského pásek pro měření I_p a fotodiodu s H_α filtrem), 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 toroidální elektrické pole E_t a zaznamenejte časový průběh napětí na závit $U_l(t)$. Z jeho průběhu a signálu z Rogovského pásku $I_{tot}(t)$ odhadněte z Ohmova zákona v prvním přiblížení odpor komory R_{ch} se zanedbáním její indukčnosti.
 - Vygenerujte na tokamaku samostatné toroidální magnetické pole B_t a zaznamenejte časový průběh na cívce $U_B(t)$.
 - Vytvořte komplexní zadání pro výboj (pracovní plyn + předionizace + toroidální elektrické pole + toroidální magnetické pole) v tokamaku a zadejte k provedení. Z napětí na závit $U_l(t)$ a z průběhu proudu na Rogovského pásku $I_{tot}(t)$ vypočítejte časový vývoj proudu plazmatem $I_p(t)$ se zanedbáním jeho indukčnosti. Následně znázorníte časový vývoj elektronové teploty $T_e(t)$.

Všechny závislosti získané z improvizované diagnostiky srovnávejte s původním diagnostickým osazením tokamaku GOLEM.

4. Vzdáleným řízením z praktik proveďte 10 výbojů, ve kterých se budete snažit pokrýt maximálně prostor parametrů (zadávejte co nejpestřejší spektrum parametrů výbojů), přičemž se pokuste dosáhnout co nejvyšší elektronové teploty.
5. Doma při zpracovávání výsledků:
 - Z vybraného vakuového výboje spočítejte (s příslušnou chybou) odpor a indukčnosti komory. Doporučujeme provést fit v gnuplotu.
 - Vytvořte tabulku 5 výstřelů s nejvyšší T_e a u každého uveďte vámi vypočtené parametry: délku výboje, maximální proud plazmatem, maximální elektronovou teplotu, maximální ohmický příkon, maximální energii plazmatu a dobu udržení maxima energie plazmatu.

2 Použité pomůcky a zařízení

Zařízení pro generaci a udržení vysokoteplotního plazmatu - tokamak GOLEM, pracovní plyn - vodík, U_l cívka, B_t cívka, Rogovského pásek, fotodioda, H_α filtr, měrka vakua, datový sběr, osciloskop Tektronix.

3 Teoretický úvod

Plazma je kvazineutrální plyn, který vzniká ionizací atomů neutrálního plynu. Skládá se z elektronů a iontů, které pocházejí převážně z pracovního plynu (vodík). Plazma se od standardního plynu liší především rozdílným typem interakcí. Jednotlivé části plazmatu spolu interagují prostřednictvím dalekosahových (řádově metry) magnetických a elektrických polí.

Tokamak je zařízení, které slouží ke zkoumání vysokoteplotního plazmatu, ve kterém by mělo docházet k jaderné přeměně, a sice sloučení lehkých prvků na těžší za uvolnění velkého množství energie. Jde o transformátor s jediným sekundárním závitem, kterým je právě vysokoteplotní (dobře vodivé) plazma. Plazma se tedy ohřívá ohmickým ohřevem. Aby se plazma nedotýkalo stěn nádoby ve tvaru toroidu využívá se silných magnetických polí, které vytváří cívky toroidálního tvaru.

3.1 Základní parametry plazmatu

Jednou z jednoduše měřitelných a poměrně dobře zmapovaných veličin je elektrický odpor plazmatu R_p , který u čistého plazmatu závisí (klesá) pouze na elektronové teplotě T_e . Předpokládáme-li parabolický průběh od centra, které má vyšší teplotu, k okraji, můžeme odvodit vztah pro náš tokamak GOLEM

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

kde $I_p(t)$ je proud tekoucí plazmatem v ampérech a $U_l(t)$ je napětí na závit v transformátoru ve voltech.

Můžeme také měřit elektronovou hustotu, kterou můžeme určit pomocí stavové rovnice ideálního plynu za předpokladu, že je konstantní a disociací vodíku získáme 2 elektrony. Pak dostáváme

$$\bar{n} = 2 \frac{p_0}{k_B T_{ch}}, \quad [\text{počet částic/m}^3] \quad (2)$$

kde \bar{n} je průměrná elektronová hustota, p_0 je tlak neutrálního plynu v komoře, k_B je Boltzmannova konstanta a T_{ch} je pokojová teplota (pro nás teplota komory).

Plazma v tokamaku ohříváme ohmickým ohřevem vznikající proudem plazmatu s konečnou vodivostí, odporem R_p . časový výkon ohmického příkonu $P_{OH}(t)$ je dán vztahem

$$P_{OH}(t) = R_p(t) \cdot I_p^2(t) \quad (3)$$

Celkovou tepelnou energii plazmatu W_{th} určíme z ekvipartičního teorému, pokud uvažujeme rovnost teplot a hustot (konstantní) elektronů a iontů. Opět uvažujeme parabolický průběh elektronové teploty T_e od středu k okraji. Získáme vztah

$$W_{th}(t) = \frac{1}{3} \bar{n} k_B T_e(0, t) V, \quad [\text{J}] \quad (4)$$

kde V je objem plazmatu. Toto je pouze hrubý odhad energie, jelikož hustota není konstantní. Ze znalosti W_{th} a ohmického příkonu P_{OH} však můžeme určit energetické ztráty P_{loss} a také dobu udržení energie $\tau_E(t)$

$$P_{loss} = P_{OH} - \frac{dW_{th}}{dt} \quad \tau_E(t) \equiv \frac{W_{th}}{P_{loss}}. \quad (5)$$

4 Experimentální uspořádání a postup měření

Měření tedy provádíme v tokamaku GOLEM, jehož parametry jsem užíval z [1]. Vhodnou orientací cívek a měřících komponent lze měřit následující veličiny. Napětí na závit U_l , měříme pomocí jediného závitu umístěného po obvodu komory. Magnetické pole B_t . Na malé cívce, kterou umístíme na komoru, se indukují napětí vlivem změny toku magnetického pole. Celkový proud I_{tot} je měřen skrze změnu toku poloidálního magnetického pole, pomocí Rogowského pásku. Fotodioda s H_α filtrem monitoruje záření plazmatu v oblasti spektra odpovídajícího přechodu elektronů mezi druhou a třetí energetickou hladinou vodíku $\lambda = 656,3 \text{ nm}$.

Pro zjištění elektromagnetických vlastností komory můžeme provést vakuový výstřel. Průběh napětí na závit při vakuovém výstřelu je dán

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{tot}(t) + L_{ch} \frac{dI_{tot}}{dt}, \quad (6)$$

kde R_{ch} je odpor komory, L_{ch} je indukčnost komory a I_{tot} je celkový proud naměřený Rogowského páskem. Pro určení parametrů jsme použili 2D metodu nejmenších čtverců, a sice nezávislé parametry R_{ch} a L_{ch} .

Proud tekoucí plazmatem a komorou představuje dva paralelní LR obvody, jejichž chování lze popsat systémem rovnic

$$U_l(t) = R_{ch} \cdot I_{ch} + L_{ch} \frac{dI_{ch}(t)}{dt} \quad (7)$$

$$U_l(t) = R_p \cdot I_p + L_p \frac{dI_p(t)}{dt} \quad (8)$$

$$I_{tot}(t) = I_p(t) + I_{ch}(t). \quad (9)$$

Indukčnost a odpor komory změříme při vakuovém výstřelu. Ovšem parametry plazmatu se liší každým výbojem.

V samotné laboratoři tokamaku GOLEM jsme pak postupovali takto:

- Na tokamak GOLEM jsme položili drát, tak aby se vinul přes jeho celý obvod (kanál 1).
- Umístili jsme fotodiodu s filtrem na jeden z průzorů do vnitřní části komory (kanál 4).
- Umístili jsme Rogowského pásek, tedy dlouhou cívku v poloidálním směru (kanál 3).
- Na boční stranu tokamaku jsme připevnili malou cívku vodorovně s komorou (kanál 2).
- Vše jsme připojili na osciloskop Tektronix a pečlivě jsme jej nastavili.
- Provedli jsme 2 vakuové výstřely, pro určení parametrů komory.
- Poté jsme provedli dalších 9 výstřelů, při kterých jsme již dosáhli plazmatu uvnitř komory.

Pozn. Kanály jsou číslovány jinak než sloupce v datové tabulce, tam se nachází první sloupec s hodnotami času pro každé měření.

5 Vypracování

Z prvních dvou vakuových výstřelů jsem vybral výstřel číslo 14897, ze kterého jsme určili parametry komory z rovnice (7). Hodnotu $dI_{ch}(t)/dt$ jsem získal z kanálu 3 na osciloskopu a I_{ch} jsem určil numerickou integrací dle návodu [2] dat ze 3 kanálů. Hodnoty získané měření pomocí Rogowského pásku jsem vždy musel vynásobit kalibrační konstantou ($1,1e7$ A/V) [1]. V programu GNUPlot jsem provedl 2D metodu nejmenších čtverců, tedy proložení grafu rovinou o rovnici $f(x, y) = ax + by$, abych určil nezávislé parametry. Graf této závislosti společně s fitovací rovinou jsem uvedl do Obrázku 1. Parametry získané programem GNUPlot přímo odpovídají odporu komory R_{ch} a její indukčnosti L_{ch} a mají hodnoty

$$a = R_{ch} = (11274 \pm 7) \cdot 10^{-6} \Omega \quad b = L_{ch} = (6,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-7} \text{H}.$$

Vykreslil jsem grafy závislosti toroidálního magnetického B pole na čase t v komoře během výboje (Obrázek 1 v Příloze) pro výstřely 14904/09/20. Z následných osmi výstřelů jsem vybral pouze pět s nejvyšší teplotou a pro každý jsem provedl následující výpočty. Pro určení proudu plazmatu $I_p(t)$ jsem provedl numerickou integraci hodnot ze 3. kanálu. Maximální hodnotu jsem pak odečetl z grafů (Obrázky 2. a 3. v Příloze).

Centrální elektronovou teplotu $T_e(t)$ jsem určil z jejího grafu (Obrázky 4. a 5. v Příloze), který jsem vykreslil dle (1), přičemž $I_p(t)$ jsem získal z rovnice (9), kde jsem $I_{ch}(t)$ získal ze vztahu (7) pomocí hodnot $U_l(t)$ z kanálu 1 a spočítaného odporu komory R_{ch} , kde jsem zanedbal indukčnost komory, jelikož hledám maximální teplotu, tzn $dI/dt = 0$.

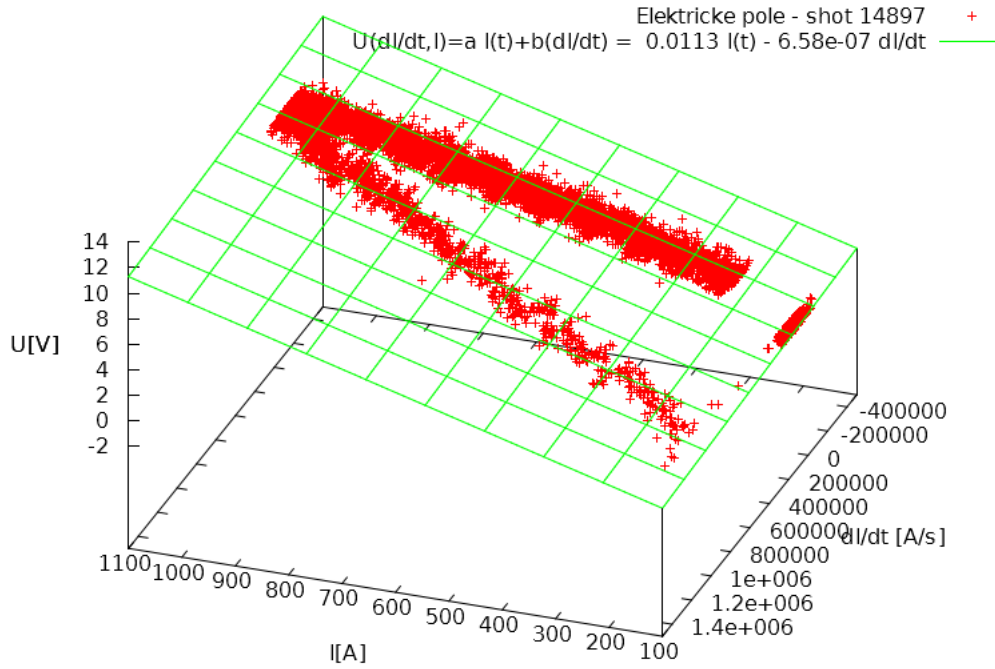
Pro výpočet délky trvání výboje t_p , jsem využil právě těchto grafů, počítal jsem jej jako rozdíl časů (osa x), kdy teplota začala růst a kdy přestala klesat.

Maximální Ohmický příkon $P_{OH}(t)$ jsem určil z grafů (Obrázky 6. a 7. v Příloze), které jsem vykreslil pomocí vztahu (8), kde jsem zanedbal indukčnost plazmatu, jelikož opět hledám maximum. Vztah (8) jsem dosadil do (3). ($I_p(t)$ jsem počítal opět numerickou integrací dat ze 3. kanálu)

Maximální energii $W_{th}(t)$ jsem určil ze vztahu (4) a (2), přičemž jsem potřeboval určit objem plazmatu V v komoře. Pro objem toroidu platí vztah

$$V = 2\pi^2 R r^2,$$

kde R je vzdálenost od středu toroidu do středu komory, r je poloměr komory. Hodnoty jsem převzal z [1]. Výslednou absolutní hodnotu jsem spočítal jako $V = 0,0357 \text{m}^3$. K určení $W_{th}(t)$ jsem potřeboval také



Obrázek 1: Naměřené hodnoty napětí na závit U v závislosti na derivaci proudu dI/dt a jeho integrálu I proložené rovinou o rovnici $U(dI/dt, I) = 0,0113 I - 6,58e-07 dI/dt$

teplotu komory T_{ch} a tlak v komoře p_0 , ty jsem získal z databáze výstřelů [3], které naměřili Vaše diagnostické přístroje. Elektronovou teplotu jsem odečetl z grafu a převedl do jednotek Kelvin, přičemž platí převodní vztah $1\text{eV} \approx 11600\text{K}$ [4].

Hodnotu udržení maximální energie plazmatu τ_E jsem určil ze vztahu (5), přičemž všechny veličiny již znám.

Všechny určené veličiny, společně s těmi, které jsem potřeboval pro výpočet jsem uvedl v Tabulce 1. Do Tabulky 2. jsem uvedl pro porovnání hodnoty, které naměřili Vaše diagnostické přístroje.

shot	p_0 [mPa]	T_{ch} [K]	t_p [ms]	T_e [eV]	I_p [kA]	W_{th} [J]	P_{OH} [kW]	τ_E [μs]
14904	12,99	315,22	8,7	37,2	1,7	0,42	36	11,8
14909	13,29	315,22	10,3	39,6	2,3	0,46	45	10,2
14914	13,34	315,22	10,5	37,6	2,4	0,44	45	9,8
14919	14,35	315,15	10,1	33,5	2,7	0,42	48	8,8
14920	13,70	315,08	10,1	33,0	2,5	0,40	44	9,0

Tabulka 1: Naměřené a spočítané hodnoty měření parametrů vysokoteplotního plazmatu v tokamaku GOLEM. První sloupec značí číslo výstřelu, pod kterým se dá najít na [3]. p_0 je tlak pracovního plynu (převážně vodík) v komoře, T_{ch} je teplota komory [3]. t_p je délka výboje, T_e je maximální centrální elektronová teplota, I_p je maximální proud tekoucí plazmatem, W_{th} je maximální energie plazmatu, P_{OH} je ohmický příkon a τ_E je doba udržení maximální energie.

6 Diskuze

Před začátkem samotného měření jsme si nejprve poslechl přednášku od Ing. Vojtěcha Svobody Csc, která nás výborně uvedla do problematiky a osvětlila činnost tokamaku. Poté jsme od asistentů obdrželi vlastní diagnostické přístroje, které jsme se snažili správně umístit na tokamak a připojit na vícekanálový osciloskop Tektronix. Ten jsme poté museli správně nakalibrovat, přičemž jsme využívali výboje, které vytvářela druhá

shot	p_0 [mPa]	T_{ch} [K]	t_p [ms]	T_e [eV]	I_p [kA]	W_{th} [J]	P_{OH} [kW]	τ_E [μ s]
14904	12,99	315,22	8,5	24,4	1,82	0,28	11,87	23,4
14909	13,29	315,22	9,8	25,3	2,17	0,29	16,04	18,4
14914	13,34	315,22	10,0	25,1	2,37	0,29	19,29	15,2
14919	14,35	315,15	9,6	24,5	2,70	0,31	26,01	11,8
14920	13,70	315,08	9,8	24,7	2,69	0,30	25,43	11,7

Tabulka 2: Naměřené a spočítané hodnoty parametrů vysokoteplotního plasmatu v tokamaku GOLEM. Veličiny mají stejný význam jako v Tabulce 1., avšak veškerá diagnostika byla provedena prostředky obsluhy tokamaku.

skupina měřící úlohu 13B. Vše jsme provedli správně dle návodu a přesunuli jsme se do praktika, odkud jsme vysílali příkazy pro uskutečnění výbojů s našimi parametry.

Seznámili jsme se s kontrolním serverem, který nám byl přidělen. Pomocí vakuových výstřelů jsme byli schopni určit odpor a indukčnost komory. Odpor, který jsme určili $R_{ch} = (11274 \pm 7) \cdot 10^{-6} \Omega$, se přibližně rovná reálné hodnotě, určené obsluhou tokamaku, a sice $R_{prak} = 9700 \cdot 10^{-6} \Omega$ [3] sekce *Data*. Avšak námi určená indukčnost $L_{ch} = (6,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-7} \text{H}$ je poloviční vůči té reálné $L_{prak} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ [3] sekce *Data*. Za tuto chybu můžou nejspíše nepřesné diagnostické přístroje.

Při zpracovávání komplexních výbojů jsme přišli na to že u cívky na měření magnetického pole jsme měli obrácenou polaritu. Naměřené hodnoty jsme tedy do grafů vynášeli s opačným znaménkem. Také jsem si všiml, že osciloskop zaznamenal množství dat, před začátkem výboje, kdy už byl odtrigrován. Ta jsem nevykresloval, neboť nám neříkají nic o průběhu výboje ve vysokoteplotním plasmatu.

Porovná-li hodnoty naměřené u komplexních výbojů naší diagnostikou a diagnostikou obsluhy tokamaku, zjistím, že se číselně přibližně shodují pouze doba trvání výboje t_p a hodnoty maximálního proudu plasmatu I_p . Naopak hodnoty elektronové teploty T_e a maximálního Ohmického příkonu P_{OH} se výrazně liší. S tím souvisí odlišnosti dopočítaných veličin maximální energie W_{th} a doby jejího udržení τ_E . Jedním ze zdrojů chyby je jistě odečítání maximální hodnoty z grafu, což je nepřesné. Chybu jsme do výpočtů zanesli také tím, že při práci s rovnicí (7) jsme zanedbali člen s indukčností komory L_{ch} , která se promítla do výpočtů energie, příkonu i s tím souvisejících veličin.

7 Závěr

Z vakuového výstřelu jsme 2D metodou nejmenších čtverců určili odpor komory jako $R_{ch} = (11274 \pm 7) \cdot 10^{-6} \Omega$ a také její indukčnost $L_{ch} = (6,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-7} \text{H}$.

Dále jsme provedli podrobnou analýzu 5 dalších výstřelů s nejvyšší elektronovou teplotou. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 1.

8 Použitá literatura

[1] Kolektiv praktik FJFI, *Manuál k úloze - Vysokoteplotní plasma v tokamaku GOLEM*,

[online]. [cit. 2014-3-29]. Dostupné z:

http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/2757/mod_resource/content/6/uloha13A_v6.pdf

[2] Golem Wiki contributors. *Doprovodná www stránka pro úlohu Tokamak GOLEM ve Fyzikálním praktiku KF FJFI*.

[online]. [cit. 2014-4-5]. Dostupné z: <http://golem.fjfi.cvut.cz/KFprakt>

[3] Tokamak GOLEM. *Shot database*.

[online]. [cit. 2014-4-5]. Dostupné z: http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/'cislo_vystrelu'/

[4] Wikipedie. *Elektronvolt - Teplota*.

[online]. [cit. 2014-4-5]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronvolt>