

Měření parametru plazmatů na tokomaku GOLEM pomocí elektrických sond

A. Macek¹, R. Beer²

¹ G Opatov, Praha; andmac.m@zaci.gopat.cz

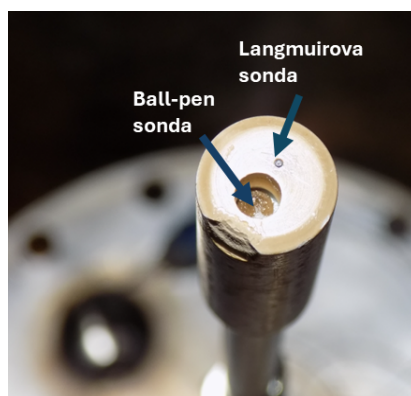
² SPŠ Zengrova, Ostrava; beerrobin24@gmail.com

O. Garanti, školitelé; Bc. V. Sedmidubský, Ing. P. Mácha, KF FJFI ČVUT

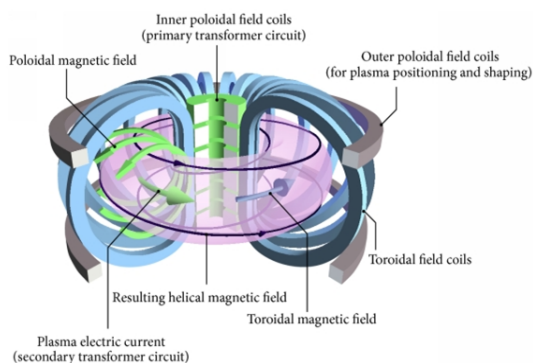
Abstrakt:

Studium okrajové oblasti plazmatu je klíčové pro pochopení chování plazmatu v tokomaku. Teplota a hustota jsou základní parametry popisující plazma a k jejich měření se používá celá řada technik. V tomto projektu je naším cílem provést ve vodíkovém plazmatu měření elektronové teploty a hustoty pomocí tří technik. Pomocí elektrických sond byla změřena elektronová teplota v okrajové oblasti plazmatu o velikosti až 15 eV a iontová hustota až $2,5 \cdot 10^{18} m^{-3}$. Pomocí proudu plazmatem a napětí na závit byla pomocí Spitzerovy formule určena centrální elektronová teplota až 100 eV. K analýze byl použit programovací jazyk Python.

1. Úvod



Obr. 1: Sondová hlavice



Obr. 2: Schéma tokamaku

Od počátku minulého století se lidé snaží pochopit a replikovat termonukleární fúzi. Výsledkem by pak měla být výroba elektřiny, která je levná a ekologicky nezávadná. V dnešní době se vědci pokouší o fúzi v plazmatu, které musí být kvůli extrémním teplotám udržováno ve speciálních přístrojích, např. takzvaných tokamacích.

Tokamak (Obr. 2) je zařízení, které pomocí magnetického pole udržuje plazma v “magnetické nádobě” a tím udržuje plazma v bezpečné vzdálenosti od stěn komory. V minulosti se lidé snažili udržet plazma v magnetických zrcadlech, ale tam částice unikaly konci. Z tohoto důvodu má komora v tokomaku tvar toroidu, tedy prstence.

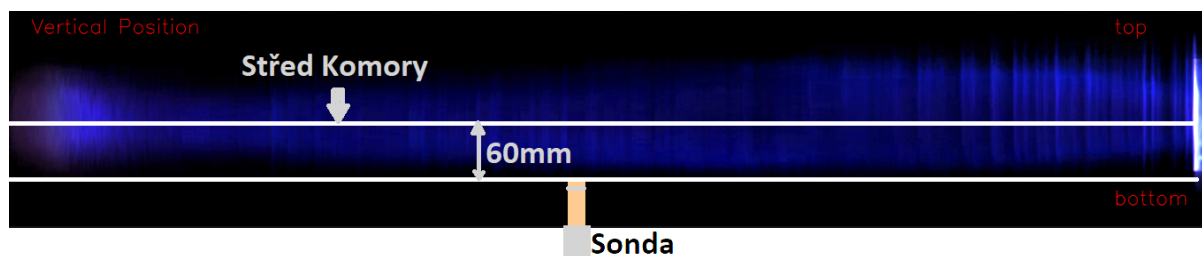
Cílem našeho miniprojektu je změřit teplotu elektronů v plazmatu elektrickými sondami, srovnat různé metody, jak teplotu získat a z hodnot vypočítat hustotu iontů v plazmatu. K dispozici máme Tokamak GOLEM [1], ve kterém jsou umístěny Langmuirova a Ball-pen [2] elektrická sonda na společné sondové hlavici (Obr. 1).

2. Měření teploty

Provedli jsme 8 výbojů, průměrné hodnoty makroskopických parametrů plazmatu jsou:

Napětí na závit	Uloop = 5,48 V (průměr)
Toridální magnetické pole	Bt = 0,44 T (průměr)
Proud plazmatem	Ip = 4,43 kA (průměr)

Obr. 3 znázorňuje pozici sondy vůči plazmatu. Sonda se nachází ve spodní části komory. Vzdálenost je měřena od středu komory.



Obr. 3: Pozice sondy vůči plazmatu

2.1. Teplota ze základní diagnostiky

Nejdříve jsme změřili proud plazmatem a napětí na závit ze základní diagnostiky. Ty jsme dosadili do Spitzerovy formule pro Tokamak GOLEM

$$T_e(0, t) = 0.9 \cdot \left(\frac{I_p(t)}{U_l(t)} \right)^{2/3}, [eV; A, V]$$

Toto měření tedy nevychází z dat elektrických sond a reprezentuje centrální elektronovou teplotu (Obr. 4).

2.2. Teplota z VA charakteristiky

Dalším způsobem, jak vypočítat elektronovou teplotu, je použít tzv. fitování voltampérové (VA) charakteristiky (Obr. 5 a 6). Pro 4 parametrový fit VA charakteristiky jsme použili funkci:

$$I = I_{sat}^+ \cdot \left[1 - \beta \left(\frac{U - U_{fl}}{T_e} \right) - \exp \left(\frac{U - U_{fl}}{T_e} \right) \right]$$

2.3. Rychlé měření teploty z plovoucích potenciálů

Třetím způsobem, jak vypočítat teplotu elektronů v místě sond, je pomocí plovoucích potenciálů z LP a BPP na kombinované sondové hlavici a kalibrační konstanty α (Obr. 6).

$$T_e = \frac{U_{fl}^{(BPP)} - U_{fl}^{(LP)}}{\alpha^{(LP+BPP)}}$$

3. Měření hustoty iontů

Veličiny měřené pomocí VA charakteristik jsme aplikovali na výpočet iontové hustoty, za předpokladu že $T_i = T_e$.

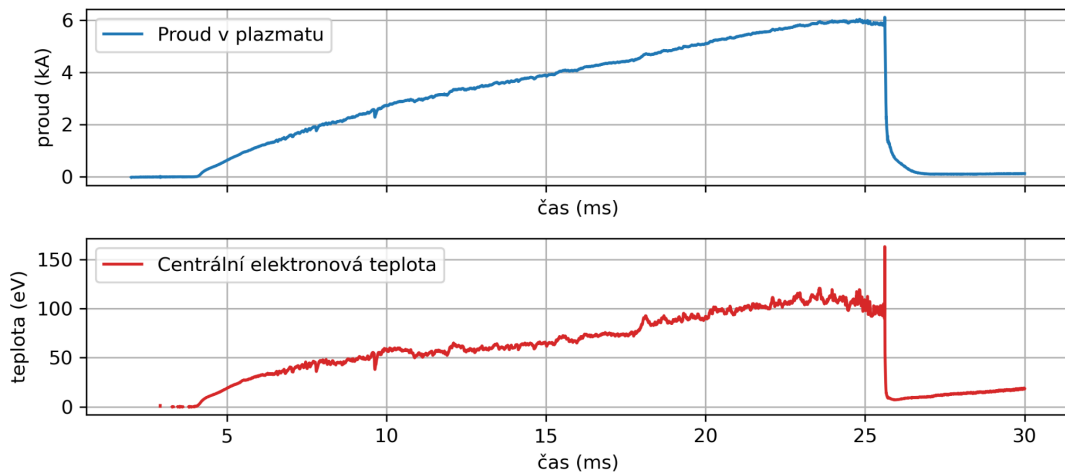
$$n_i = f(T_e, I_{sat}^+) = \frac{I_{sat}^+}{e \cdot c_s^i \cdot S_{probe}}$$

$$(c_s^i)^2 = \frac{\gamma k_B T_i}{m_i} \approx \frac{2 \cdot e \cdot T_e [eV]}{m_i}$$

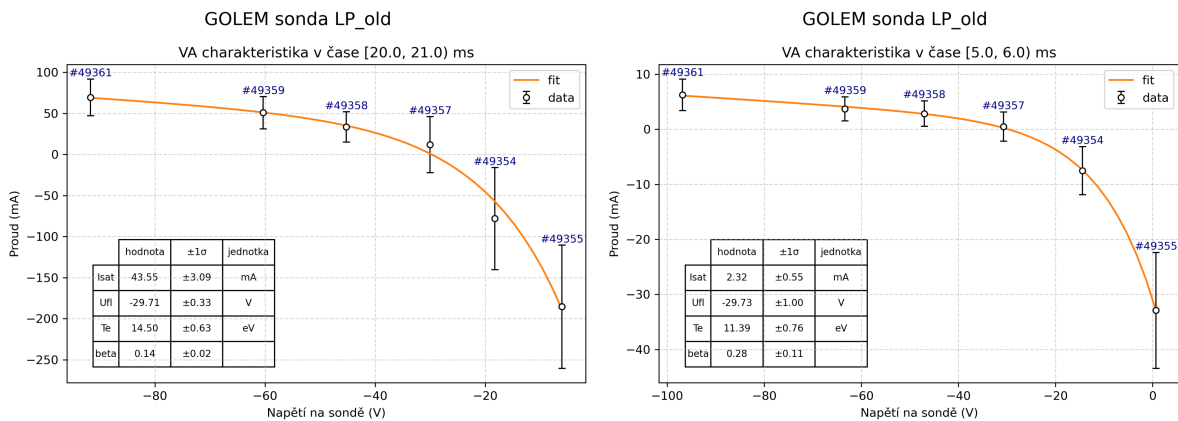
(assumes $T_i = T_e$)

4. Výsledky

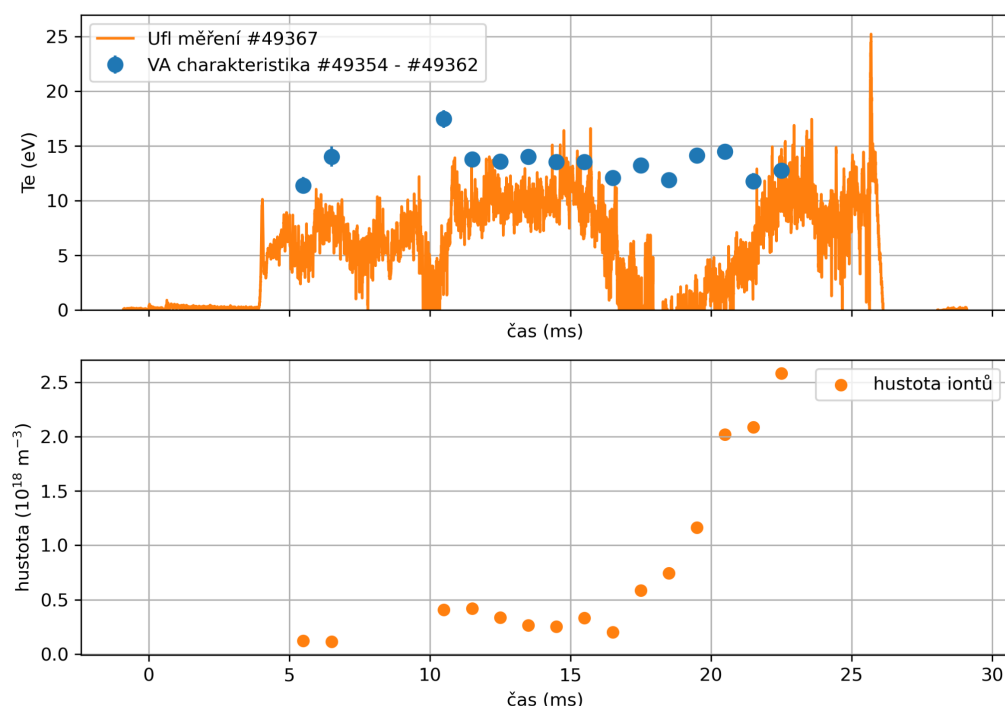
Teplota elektronů ve středu plazmatu #49367



Obr. 4: Časový vývoj proudu plazmatem a centrální teploty



Obr. 5: Příklad změřených VA charakteristik včetně parametrů fitu



Obr. 6: Časový vývoj elektronové teploty a hustoty

5. Shrnutí

Cílem našeho projektu bylo změřit hustotu iontů a teplotu 3 různými způsoby, což se nám podařilo. Jednotlivá měření teploty v zásadě korelují s očekávanými hodnotami. Různá měření ze sond si navzájem odpovídají až na interval mezi 17. a 22. milisekundou. Předpokládáme, že tato chyba je způsobena parazitním signálem, pravděpodobně ze stabilizace plazmatu.

Z našich výsledků vyplývá, že by měla proběhnout kalibrace sond, pro zmenšení rozdílu mezi různými měřeními.

Poděkování

Především bychom chtěli poděkovat našim odborným garantům, kteří nám výrazně pomohli s přípravou našeho projektu.

Také děkujeme FJFI ČVUT za poskytnutí zázemí pro projekt.

Reference

- [1] Svoboda, Vojtech & Pokol, G & Réfy, Dániel Imre & Stockel, J. & Vondrášek, G. Former tokamak CASTOR becomes remotely controllable GOLEM at the Czech Technical University in Prague.
- [2] Adamek, Jiri & Ionita, C. & Schrittwieser, Roman & Stockel, J. & Tichy, Milan & Oost, G.. (2005). Direct measurements of the electron temperature by a ball-pen/langmuir probe. 3. 2214-2217.